

Nivel de exposición personal a material particulado
inhalable PM_{2.5} proveniente de vías de alto tráfico
vehicular de la ciudad de Barranquilla

Rodrigo Rafael Rodríguez Reales
Yuleisy Paola Núñez Blanco



Corporación Universidad de la Costa
Facultad de Ciencias Ambientales
Programa de Ingeniería Ambiental
Barranquilla, Colombia

2016

Nivel de exposición personal a material particulado inhalable PM_{2.5} proveniente de vías de alto tráfico vehicular de la ciudad de Barranquilla

Rodrigo Rafael Rodríguez Reales

Yuleisy Paola Núñez Blanco

Trabajo de investigación presentado para obtener el título de Ingeniero Ambiental

Asesor:

Ms.C. Eliana Lizeth Vergara Vásquez

Co-asesor:

Ms.C. Leandro Gómez Plata

Corporación Universidad de la Costa
Facultad de Ciencias Ambientales
Programa de Ingeniería Ambiental
Barranquilla, Colombia

2016

Dedicatoria

A mi Dios, por la vida y la naturaleza que me rodea.

A mis padres, las personas más importantes de mi existencia, por enseñarme a no desistir de mis sueños. Soy muy afortunado de tenerlos, incluso cuando ya no estén a mi lado, mi firmeza para alcanzar las metas propuestas será gracias a ustedes. Los amo a los dos, nunca se olviden de eso.

A Milene, Lina y Rubén, por aligerar incalculablemente mis cargas con su hospitalidad durante mi vida universitaria.

A Yule, mi compañera de batallas, gracias por tu paz e indescriptible constancia.

Rodrigo Rafael Rodríguez Reales

Dedicatoria

A Dios por ser mi luz y llenar mi espíritu de fe, fuerza y sabiduría.

A mis padres Jorge Núñez y Lydia Blanco, por apoyarme, guiarme, brindarme la confianza y el ánimo para construir mis sueños. Ustedes son mi razón de ser, mi motor.

A mi hermano Jesús David por su afecto y cariño, eres mi motivo de felicidad, te agradezco por ayudarme a encontrar el lado dulce de la vida.

A mi compañero Rodrigo Rodríguez por sus brillantes ideas, hicimos un buen equipo.

Yuleisy Paola Núñez Blanco

Agradecimientos

A Ms.C. Eliana Vergara y a Ms.C. Leandro Gómez, asesora y co-asesor de nuestro trabajo de grado, por brindarnos su valioso tiempo y conocimientos e impulsarnos a alcanzar la meta.

A la laboratorista Erika Arbeláez, por su admirable colaboración y gestión, sin ella ésta investigación no hubiese sido posible.

Al Ing. Elías González, por su disposición incondicional y su preciado discernimiento.

A la Universidad de la Costa, por contribuir y formarnos como profesionales.

A nuestros amigos, por tener siempre una palabra de ánimo, estar en las buenas y en las malas, sabernos escuchar y llenarnos de alegría.

A nuestras familias, por el acompañamiento y apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

Resumen

En la presente investigación, se evaluó el nivel de exposición personal a material particulado inhalable $PM_{2.5}$ proveniente de vías de alto tráfico vehicular de la ciudad de Barranquilla. Para ello, se siguió la metodología propuesta por la U.S. EPA para la evaluación del riesgo, que consta de las siguientes etapas: (1) identificación del riesgo, (2) evaluación de la relación dosis-efecto, (3) evaluación de la exposición y (4) caracterización del riesgo.

Para el desarrollo de este estudio, se seleccionaron tres estaciones estratégicas sobre vías con alto tráfico vehicular de la ciudad Barranquilla para realizar el muestreo, tales como: Carrera 45 con la calle 39 (Centro), Carrera 46 con la calle 90 (Autónoma) y Carrera 43 con la calle 72 (Calle 72). De la misma forma, se contempló un *blanco* como estación de monitoreo para el estudio, siendo éste el Parque Jardín Botánico. Se efectuaron dos campañas de monitoreo (un día hábil y un día no hábil) para cada una de las estaciones seleccionadas. Se utilizaron dos bombas personales de muestreo de aire TUFF™ marca Casella de referencia Standard, con espumas filtro de poliuretano y filtros de politetrafluoroetileno (teflón) de 37 mm para separar las partículas gruesas de las finas, respectivamente.

El máximo valor de concentración a exposición personal se presentó en la estación de monitoreo de la Calle 72, con un resultado de $238.10 \mu g/m^3$ en el día hábil; mientras que, el mínimo reportado fue en la estación del Jardín Botánico con un valor de $59.52 \mu g/m^3$ para la jornada del día no hábil. Mediante el uso del ANOVA jerarquizado, se determinó que no existen diferencias significativas entre la media de las dosis del hombre y la mujer ni en las estaciones de muestreo. Sin embargo, existen diferencias estadísticamente significativas entre la media de los dos tipos de días. En cuanto al riesgo cancerígeno, se determinó que las personas que laboran cerca de la estación de la Calle 72 son quienes más probabilidades tienen de desarrollar cáncer de pulmón. Simultáneamente, en el riesgo no cancerígeno, los hombres que laboran cerca de las estaciones de la Calle 72, Autónoma y Centro superan el límite seguro de exposición.

Palabras claves: Material particulado $PM_{2.5}$, evaluación del riesgo, exposición personal, vías de alto tráfico vehicular.

Abstract

In this research, we evaluated the personal exposure level to fine particulate matter PM_{2.5} from high traffic roads in the city of Barranquilla. Therefore, we followed the methodology proposed by the U.S. EPA for risk assessment, which consists of the following steps: (1) hazard identification, (2) dose-response assessment, (3) exposure assessment and (4) risk characterization.

To develop this study, three strategic monitoring stations were selected on roads with high traffic from the city of Barranquilla, such as: Carrera 45 with Calle 39 (Centro), Carrera 46 with Calle 90 (Autónoma) and Carrera 43 with Calle 72 (Calle 72). Likewise, a green space was contemplated as a monitoring station for the study, which is the Parque Jardín Botánico. Two monitoring campaigns (one business day and one weekend day) were performed for each monitoring station. Two personal air sampling pumps TUFF™ standard model from Casella were used with polyurethane foam filters and 37 mm polytetrafluoroethylene (PTFE) filters to remove coarse particles from fine, respectively.

The maximum concentration value for personal exposure was obtained at the monitoring station Calle 72 with a result of 238.10 µg/m³ on the business day, while the minimum result reported was at the monitoring station Jardín Botánico with a value of 59.52 µg/m³ for the weekend day. According to ANOVA hierarchical, it was determined that there are not statistically significant difference between the mean doses of men and women nor the sampling stations. However, there are statistically significant difference between the mean of the two types of days. With regard to the carcinogenic risk, it was determined that people who work near the Calle 72 monitoring station are the ones more likely to develop lung cancer. Simultaneously, in the non-carcinogenic risk, men who work near Calle 72, Autónoma y Centro monitoring stations exceed the permissible exposure limit.

Keywords: Particulate matter PM_{2.5}, risk assessment, personal exposure, high traffic roads.

Tabla de contenido

1. Introducción	16
2. Planteamiento y justificación del problema	18
3. Objetivos.....	19
3.1 Objetivo general	19
3.2 Objetivos específicos.....	19
4. Estado del arte	20
5. Marco teórico	24
5.1 Material particulado PM _{2.5}	24
5.2 Efectos en la salud por material particulado PM _{2.5}	26
5.3 Evaluación de riesgo para contaminantes tóxicos del aire	27
5.3.1 Identificación del riesgo.....	29
5.3.2 Estudios epidemiológicos	29
5.3.3 Ensayos en animales	30
5.3.4 Propiedades físico-químicas	30
5.3.5 Relaciones estructura-actividad	30
5.3.6 Metabolismo comparado y toxicocinética	30
5.4 Evaluación de la relación dosis-efecto	30
5.4.1 Datos toxicológicos utilizados	31
5.4.2 Efectos no cancerígenos.....	31
5.4.3 Efectos cancerígenos.....	33
5.5 Evaluación de la exposición.....	34
5.5.1 Caracterización del escenario de exposición	34
5.5.2 Identificación de la ruta de exposición	34
5.5.3 Cuantificación de la exposición	35
5.5.3.1 Concentración del contaminante	35
5.5.3.2 Dosis de exposición al contaminante	36
5.6 Caracterización del riesgo	36
5.6.1 Valoración de los resultados	37
6. Metodología.....	38

6.1	Área de estudio.....	38
6.1.1	Localización.....	38
6.1.2	Condiciones climatológicas	39
6.2	Monitoreo de PM _{2.5}	41
6.2.1	Tratamiento de muestras	41
6.2.2	Toma de muestras	41
6.3	Análisis de las muestras	42
6.3.1	Cuantificación de la concentración de PM _{2.5}	42
6.3.2	Determinación de la dosis de exposición a PM _{2.5}	43
6.3.3	Estimación del riesgo de la población a PM _{2.5}	44
6.3.3.1	Cuantificación del riesgo	44
6.3.3.1.1	Efectos cancerígenos	44
6.3.3.1.2	Efectos no cancerígenos	45
6.3.4	Análisis e interpretación de los resultados.....	46
7.	Resultados.....	48
7.1	Concentración de PM _{2.5}	48
7.2	Dosis de exposición a PM _{2.5}	50
7.3	Riesgo de la población a PM _{2.5}	53
7.3.1	Estimación del riesgo cancerígeno.....	53
7.3.2	Estimación del riesgo no cancerígeno.....	57
8.	Discusión de los resultados.....	61
8.1	Cuantificación de la concentración de PM _{2.5}	61
8.2	Comparación de las dosis de exposición en hombre y mujer a PM _{2.5}	62
8.3	Estimación del riesgo de la población a PM _{2.5}	63
9.	Conclusiones.....	66
10.	Recomendaciones	68
11.	Bibliografía	70
12.	Anexos	76

Lista de figuras

<i>Figura 1.</i> Ejemplificación del PM _{2.5}	25
<i>Figura 2.</i> Etapas de la evaluación del riesgo.	28
<i>Figura 3.</i> Curva de Dosis-Respuesta	32
<i>Figura 4.</i> Área de estudio.	39
<i>Figura 5.</i> Variables meteorológicas en la ciudad de Barranquilla.....	40
<i>Figura 6.</i> Bomba personal de muestreo de aire TUFF.	42
<i>Figura 7.</i> Concentración de partículas finas y gruesas.	49
<i>Figura 8.</i> ANOVA jerarquizado de acuerdo al Tipo de Día y la Estación.	51
<i>Figura 9.</i> ANOVA jerarquizado de acuerdo al Tipo de Día, Estación y Género.	52
<i>Figura 10.</i> Riesgo individual de contraer cáncer de pulmón por exposición a PM _{2.5}	54
<i>Figura 11.</i> Riesgo poblacional de contraer cáncer de pulmón por exposición a PM _{2.5}	56
<i>Figura 12.</i> Índices de Peligro de un hombre y una mujer expuestos a PM _{2.5}	58
<i>Figura 13.</i> Margen de Exposición a material particulado PM _{2.5}	60

Lista de tablas

<i>Tabla 1.</i> Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de partículas finas y gruesas	48
<i>Tabla 2.</i> Dosis de exposición de un hombre y una mujer a material particulado PM _{2.5}	50
<i>Tabla 3.</i> ANOVA para la dosis.....	51
<i>Tabla 4.</i> Riesgo individual de contraer cáncer de pulmón por exposición a PM _{2.5}	53
<i>Tabla 5.</i> Riesgo poblacional de contraer cáncer de pulmón por exposición a PM _{2.5}	55
<i>Tabla 6.</i> Índices de Peligro de un hombre y una mujer expuestos a PM _{2.5}	57
<i>Tabla 7.</i> Margen de Exposición a PM _{2.5}	59

Glosario

Absorción. Proceso por medio del cual un toxico atraviesa membranas y capas de células hasta llegar al torrente sanguíneo y luego es transportado hacia otros órganos.

Caracterización del riesgo. Es el último paso de la evaluación del riesgo. Consiste en determinar si es tolerable el nivel de riesgo de que se produzcan daños asociados a la exposición a los tóxicos presentes en el sitio.

Carcinógeno. Cualquier agente químico, físico o biológico que puede actuar sobre un tejido vivo y aumentar la incidencia de neoplasias malignas. En términos más simples, un carcinógeno es cualquier sustancia que cause cáncer.

Concentración. Término de carácter general que se refiere a la cantidad de un material o sustancia contenida en unidad de cantidad en un medio dado.

Dosis. La cantidad de una sustancia ingresada al organismo por unidad de peso corporal de éste.

Dosis absorbida. La cantidad de una sustancia que penetra a través de las fronteras de intercambio de un organismo, ya sea por procesos físicos o biológicos, después del contacto (exposición).

Dosis administrada. La cantidad de una sustancia dada a un humano o animal de experimentación en la determinación de relaciones dosis-respuesta, especialmente por ingestión o inhalación.

Dosis aplicada. La cantidad de una sustancia dada a un humano o a un animal de prueba en la determinación de relaciones dosis-respuesta, especialmente a través de contacto dérmico.

Dosis de referencia (RfD o DRf). Es el índice de toxicidad que más se utiliza en la evaluación de riesgos por exposición a sustancias no cancerígenas. Es el nivel de exposición diaria que no produce un riesgo apreciable de daño en poblaciones humanas, incluyendo las subpoblaciones sensibles.

Efecto adverso o daño. Es una función de la dosis y de las condiciones de exposición (vía de ingreso, duración y frecuencia de las exposiciones, tasa de contacto con el medio contaminado, entre otros).

Efecto toxico o respuesta toxica. Cualquier desviación del funcionamiento normal del organismo que ha sido producida por la exposición a sustancias toxicas. El tipo de efecto toxico que produce una sustancia sirve para hacer una clasificación general de los tóxicos en: (1) cancerígenos; (2) no cancerígenos; y (3) tóxicos para el desarrollo.

Escenario de exposición. Área física que comprende el lugar donde se derraman o emiten los tóxicos al ambiente, donde se transportan y donde las poblaciones entran en contacto con los medios contaminados.

Estimación del riesgo. Evaluación, con o sin modelos matemáticos, de la probabilidad y naturaleza de los efectos de la exposición a una sustancia química a partir de la cuantificación de las relaciones de dosis-efecto y dosis- respuesta para esa sustancia, la población y los componentes ambientales que pueden estar expuestos, y mediante la evaluación de los niveles de exposición potencial de las personas, organismos y ambiente en riesgo.

Evaluación de la exposición. Evaluación cuantitativa o cualitativa del contacto de una sustancia química con la parte externa del cuerpo humano que incluye intensidad, frecuencia y duración del contacto, vía de exposición (por ejemplo, dérmica, oral o respiratoria), tasas (tasas de ingestión química), cantidad resultante que excede el límite (dosis) y cantidad absorbida (dosis interna).

Evaluación de riesgos. Identificación y cuantificación del riesgo resultante del uso o la presencia de una sustancia química, considerando los posibles efectos dañinos en los individuos o la sociedad por usar dicha sustancia en la cantidad y de la manera propuesta y tomando en cuenta todas las rutas de exposición posibles. Idealmente, la cuantificación requiere el establecimiento de relaciones de dosis-efecto y dosis-respuesta en individuos y poblaciones diana apropiados.

Exposición. Proximidad y/o contacto con la fuente de un agente (químico, físico, etc.) en la cual la transmisión efectiva del agente o los efectos adversos del agente pueden ocurrir.

Factor de potencia carcinogénica (FPC). Valor inverso de concentración o dosis, derivado de la pendiente de una curva de dosis-respuesta; en la práctica está limitado a los efectos carcinógenos con una curva que se asume es lineal a bajas concentraciones o dosis. El producto del factor de pendiente y la exposición refleja la probabilidad de producción del efecto considerado.

Histopatología. Especialidad médica que se encarga del estudio de las lesiones y alteraciones celulares, tejidos, órganos, de sus consecuencias estructurales y funcionales y por tanto de las repercusiones en el organismo.

Identificación del riesgo. Reconocimiento de un peligro potencial y definición de los factores necesarios para determinar la probabilidad de exposición de poblaciones u organismos a tal peligro y el daño resultante de tal exposición.

Índice de peligro (IP). Relación entre la dosis de exposición medida y el valor de la dosis de referencia (RfD) que tiene una sustancia.

Margen de exposición (ME). Relación entre el nivel sin efecto adverso observable (NOAEL) y la dosis o concentración teórica o estimada.

Nivel sin efecto adverso observable (NOAEL). La máxima concentración o nivel de una sustancia, hallada experimentalmente o por observación, que no causa alteraciones adversas detectables en la morfología, capacidad funcional, crecimiento, desarrollo o duración de la vida de los organismos diana, bajo condiciones definidas de exposición.

Nivel sin efecto adverso observable equivalente en humanos (NOAEL_{HEC}). La máxima concentración o nivel de una sustancia en el que no se observan efectos dañinos equivalente en humanos.

Relación de dosis-efecto. Asociación entre la dosis y la magnitud de un efecto graduado continuamente, ya sea en un individuo o población o en animales de experimentación.

Relación de dosis-respuesta. Asociación entre la dosis y la incidencia de un efecto biológico definido en una población expuesta.

Riesgo. Probabilidad de ocurrencia de un evento dado.

Ruta de exposición. Trayectoria que sigue un toxico desde la fuente de emisión hasta el contacto con las poblaciones previamente seleccionadas como potencialmente expuestas, incluyendo la vía de ingreso del toxico a los organismos expuestos.

Unidad de riesgo (UR). Incremento del riesgo para la vida que se estima se derivará de la exposición, durante toda la vida (70 años), a la concentración de 1 mg/m³ de un agente en el aire, o de 1 mg/L en el agua.

Vía de exposición. Medio por el que un tóxico accede a un organismo sea a través del tracto gastrointestinal o vía digestiva o enteral (ingestión), del tracto respiratorio o vía respiratoria o pulmonar (inhalación), a través de la piel o vía dérmica o cutánea (tópica) o mediante introducción o inyección por las vías intravenosa, subcutánea, intramuscular o intraperitoneal.

1. Introducción

A nivel mundial, el parque automotor es la cuarta mayor fuente de emisiones después de la producción de electricidad y calor, la industria y la agricultura y la silvicultura (EPA, 2015; Kholod et. al., 2016). Las emisiones de material particulado generadas por el tráfico vehicular son conocidas por su gran impacto sobre la población expuesta; asociándose una amplia gama de efectos adversos en la salud incluyendo enfermedades del corazón, enfermedades respiratorias y cáncer (Garshick et al., 2004; Brugge et al., 2007; Suglia et al., 2008; Allen et al., 2009; Health Effects Institute, 2010; Rowangould, 2015).

La contaminación de aire en Colombia es causada principalmente por el uso de combustibles fósiles por fuentes móviles, constituyéndose en un 86% la participación del transporte terrestre. El 41% del total de las emisiones se genera en las principales ciudades del país donde Bogotá lidera, seguida por Medellín y Cali (University College London & Universidad de los Andes, 2013). Actualmente, la capital de país es reconocida como una de las ciudades con mayor contaminación atmosférica en América Latina (Organización Panamericana de la Salud, 2005).

Barranquilla, localizada en el vértice nororiental del departamento del Atlántico sobre la orilla occidental del río Magdalena, muy cerca de su desembocadura en el mar Caribe, es la cuarta ciudad más poblada de Colombia con una población de 1'218.475 habitantes (DANE, 2015), la emisión de gases producida por el tráfico vehicular es la principal fuente de contaminación del aire con un 34% de contribución. Las actividades de transporte que se realizan en la población arrojan a la atmósfera contaminantes que podrían estar afectando desfavorablemente la calidad del aire que respiran sus habitantes (Martínez et al., 2007). Los contaminantes emitidos en la capital del Atlántico por los vehículos son: monóxido de carbono (89,12%), dióxido de azufre (0,23%), hidrocarburos (6,46%), óxidos de nitrógeno (3,82%) y partículas (0,37%) (Contraloría Distrital de Barranquilla, 2013).

No obstante, se ha planteado en la literatura científica, la gran diferencia existente entre la medición de exposición en áreas fijas frente a la personal en grupos de personas que laboran en zonas cercanas al tráfico, y se discute la influencia como dichas diferencias pueden detectar límites de exposición donde no se han determinado (Stevez, 2010)

Por consiguiente, se hace necesario identificar y medir la concentración personal de material particulado $PM_{2.5}$ proveniente de vías de alto tráfico vehicular de la ciudad de Barranquilla, además, determinar la dosis respirable en un hombre y una mujer que se encuentren expuestos al contaminante, y así, valorar finalmente el riesgo asociado de acuerdo a elementos como grupo de personas expuestas, tiempo y espacio.

2. Planteamiento y justificación del problema

Las grandes capitales del mundo están preocupadas por la contaminación que emiten las diferentes clases de vehículos y es frecuente en estas ciudades el monitoreo del material particulado $PM_{2.5}$ (Quijano & Orozco, 2005), como ocurre en los Estados Unidos, donde numerosos trabajos cuantifican el impacto de las $PM_{2.5}$ desde hace décadas (Linares & Díaz, 2009). Pese a ello, se conoce muy poco acerca de la exposición a contaminantes del aire en países en desarrollo de Asia, África y América Latina, donde las comunidades presentan crecientes niveles de población y se enfrentan a un rápido desarrollo urbano e industrial (Pant, Guttikunda, & Peltier, 2016).

En los países latinoamericanos, especialmente en Colombia, se presentan muy pocos estudios en cuanto a la calidad de aire por parte de las autoridades ambientales, aun así, el combustible diésel se usa extensamente en el transporte público y su uso constituye una fuente de partículas finas al ambiente (Rojas & Galvis, 2005). Los vehículos automotores impulsados por motores diésel son la fuente de mayor impacto sobre la exposición de la población a altas concentraciones de material particulado, siendo los responsables del 80% de las emisiones de este contaminante atmosférico (Rojas, 2007).

Hoy en día se desconoce a nivel nacional investigaciones relacionadas con la evaluación del riesgo por inhalación de $PM_{2.5}$ a nivel de exposición personal en vías de alto tráfico vehicular. Consecuentemente, se hace necesario realizar éste estudio inédito donde se busca cuantificar la concentración y la dosis de $PM_{2.5}$ de forma individual en hombre y mujer en vías de alto tráfico vehicular en la ciudad de Barranquilla, evaluando su comportamiento en el espacio y el tiempo, y así, estimar el riesgo de la población expuesta. Todo esto para dar respuesta al siguiente interrogante:

¿Cuál es el nivel de exposición al material particulado inhalable $PM_{2.5}$ que tiene un hombre y una mujer al laborar cerca de distintas vías de alto tráfico vehicular de la ciudad de Barranquilla?

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la exposición personal al material particulado inhalable $PM_{2.5}$ en personas que laboran cerca de vías de alto tráfico vehicular de la ciudad de Barranquilla.

3.2 Objetivos específicos

- Cuantificar los niveles de material particulado inhalable $PM_{2.5}$ en vías de alto tráfico vehicular de la ciudad de Barranquilla.
- Comparar las dosis de exposición a material particulado inhalable $PM_{2.5}$ en hombre y mujer en vías de alto tráfico vehicular de la ciudad de Barranquilla.
- Estimar el riesgo en la población expuesta a material inhalable $PM_{2.5}$ en vías de alto tráfico vehicular de la ciudad de Barranquilla.

4. Estado del arte

La atmósfera es la parte del ambiente con la que el organismo humano está permanentemente en contacto. De hecho, muchas de sus reacciones pueden ser explicadas como la respuesta a los cambios en el estado físico y químico de la atmósfera (Jendritzky, 1993; Ballester et. al., 1999). Algunos autores consideran que con el dominio del fuego por el hombre se inició la contaminación del aire, pero es con el proceso de industrialización que este fenómeno alcanzó una nueva dimensión (Romero, Diego, & Alvarez, 2006). La contaminación del aire es una forma de degradación del ambiente que se ha generalizado en todo el mundo y en especial en América Latina por el crecimiento económico y poblacional, especialmente en las áreas urbanas (Stevez, 2010). Reportes de Global Environmental Monitoring System (GEMS), en base a datos registrados sobre una muestra de alrededor de 50 ciudades, señalan que, a mediados de la década pasada, más de 1.300 millones de personas vivían en ciudades de más de 250.000 habitantes, en las cuales no se cumplían las recomendaciones impuestas por la World Health Organisation, en cuanto a calidad del aire en lo referente a partículas en suspensión (Corvalán, 1998).

En las principales áreas metropolitanas, la principal fuente de emisión de los vehículos es el material particulado (Schauer et al., 1996; Querol et al., 2001; Kam et al., 2012). El material particulado emitido por los motores diesel (DPM) ha sido de gran preocupación a nivel mundial debido a los efectos adversos sobre la salud humana (Oberdorster, 2001; USEPA, 2002; Nel, 2005; Betha & Balasubramanian, 2011) y el ambiente (Hansen et al., 2000; Jacobson, 2001; Betha & Balasubramanian, 2011). Diversas investigaciones han informado de los problemas relacionados con la salud pública, como la inflamación de las vías respiratorias, la inflamación celular y el cáncer de pulmón por exposición al DPM (Ohtoshi et al, 1998; Castranova et al, 2001; Garshick et al., 2004; Patel et al., 2011; Betha & Balasubramanian, 2011) siendo las poblaciones cercanas a las vías de mayor tráfico vehicular las más susceptibles (Tonelada et al., 2007; Kam et al., 2012), por ende, existe una preocupación particular por las personas que trabajan cerca de las vías de tránsito vehicular, ya que investigaciones previas han demostrado que este grupo de población ha de ser las

más propensas a las enfermedades respiratorias o al cáncer de pulmón (Lewne et al., 2007; Ngo et al., 2015).

El tráfico causado por el parque automotor con frecuencia hace una contribución muy significativa (5 - 80% dependiendo del sitio y la ubicación) a concentraciones en el aire de material particulado (Thorpe y Harrison, 2008; Belis et al, 2013; Pant & Harrison, 2013). Sin embargo, la mayoría de las investigaciones realizadas se han llevado a cabo en los EE.UU. o Europa, habiendo una falta de información fiable sobre las emisiones producidas por el tráfico en zonas con alta densidad de población de África, Asia y América del Sur (Pant & Harrison, 2013)

En México Central, Tovalín-Ahumada, Whitehead & Blanco (2007) llevó a cabo un estudio para comparar las exposiciones personales ocupacionales y no ocupacionales a $PM_{2.5}$ de treinta y seis trabajadores de la Ciudad de México y diecisiete en Puebla. Treinta eran trabajadores al aire libre (es decir, conductores de autobús, taxistas, vendedores ambulantes e inspectores de vehículos) y veintitrés eran trabajadores de oficina. Sus exposiciones personales a $PM_{2.5}$ fueron controlados durante un período medio de 19 horas. En la Ciudad de México, los vendedores ambulantes ($210,4 \mu g/m^3$) y los taxistas ($178,0 \mu g/m^3$) en general tuvieron exposiciones ocupacionales significativamente más altas que los trabajadores de oficina ($140,4 \mu g/m^3$). En Puebla, los conductores de autobús ($133,7 \mu g/m^3$) tenían una exposición ocupacional superior a los inspectores de vehículos ($79,9 \mu g/m^3$) y los trabajadores de oficina ($74,3 \mu g/m^3$).

En Nairobi, la capital de Kenia, Ngo et al. (2015) realizó el primer estudio para evaluar la exposición personal a $PM_{2.5}$ de personas que trabajan a lo largo de las carreteras de la ciudad durante 8 horas. En ese estudio piloto se contrató a tres personas por cuatro ocupaciones distintas (es decir, doce participantes); éstos grupos ocupacionales eran vendedores ambulantes, conductores de autobuses, mecánicos y mujeres que vivían y trabajaban en o cerca de Mathare, uno de los asentamientos más antiguos de Nairobi. Se evidenció que los conductores de autobús tenían la mayor exposición a $PM_{2.5}$ con una media de $103,8 \mu g/m^3$, siendo la única ocupación que experimentó diferencias estadísticas de niveles de exposición de los otros tres grupos ($p < 0,05$), mientras que la media de los niveles de exposición de

PM_{2.5} para los vendedores ambulantes (69,7 µg/m³), mecánicos (57,8 µg/m³), y mujeres en Mathare (62,7 µg/m³), no fueron estadísticamente diferentes uno de otro.

En otro estudio, Laia et al. (2004) evaluó la exposición personal a PM_{2.5} de los cuarenta y siete trabajadores de un peaje de una autopista en Taipéi, Taiwán. Los trabajadores fueron monitoreados durante 8 horas, en diez días. La concentración de PM_{2.5} para los trabajadores en los carriles de camiones y autobuses fue sustancialmente mayor (308 µg/m³) en comparación con los trabajadores en carriles de pago en efectivo para carros (115 µg/m³) y los trabajadores en carriles de pago con boletos para carros (109 µg/m³)

Por otro lado, estudios han reportado que los niveles de emisiones de vehículos son más bajos en los fines de semana (Rose et al, 2006; Barmpadimos et al., 2011; Pant & Harrison, 2013). Un análisis del ciclo semanal de las concentraciones de material particulado de fracción gruesa (2,5 – 10 µm) con las emisiones semanales del material particulado de fracción gruesa proveniente de diferentes medios de transportes se llevó a cabo en Zurich, Suiza y se estimó que casi el 70% y el 53% de la fracción gruesa de PM en el ambiente es aportada por el tráfico en días laborables y fines de semana, respectivamente (Barmpadimos et al., 2011; Pant & Harrison, 2013).

En Colombia, Stevez (2010) realizó el primer estudio de exposición personal a material particulado, específicamente PM₁₀, y la presencia de alteraciones en la salud en policías de tránsito que trabajan en el área metropolitana de Bogotá, siendo un aporte científico al campo de la toxicología ocupacional y ambiental. En esa investigación se presentó la aplicación de un diseño de cuantificación de exposición individual mediante muestreo personal de material particulado menor a 10 micras, donde se correlacionó epidemiológicamente la presencia de síntomas respiratorios agudos en los policías de tránsito expuestos a la contaminación del aire en su jornada laboral.

En Colombia existe una deficiencia de trabajos de investigación que evalúen la exposición a PM_{2.5} en poblaciones que laboren en zonas cercanas al tráfico vehicular. Si bien algunas de las ciudades del país cuentan con estaciones fijas de monitoreo de material particulado, Sanchez-Triana, Ahmed, & Awa (2007) mencionan que éstas concentraciones pueden variar ampliamente de una estación a otra o de un período al siguiente, donde el valor de la media

no refleje exactamente qué tan grave es la contaminación del aire. Sin embargo, dicha exposición cuantificada de forma global con estaciones de monitoreo fijas, no permite dar una correlación confiable entre la exposición y el desenlace, reportándose que los valores del monitoreo personal pueden llegar a ser hasta cinco veces mayores que las concentraciones de las áreas correspondientes monitoreadas, aun si la duración del muestreo fuese menor en el personal (Lioy et al., 1990; Watt et al., 1995; Stevez, 2010)

5. Marco teórico

5.1 Material particulado PM_{2.5}

El material particulado (PM) es uno de los contaminantes del aire más importantes para estudiar. Numerosas investigaciones han relacionado la exposición a corto plazo de la contaminación por material particulado con el aumento de las afectaciones en la salud humana (Pope and Dockery, 2006; Chen et al., 2013). El material particulado presenta un rango de tamaños entre 0.001 y 50 μm . Debido a que son de diferentes tamaños y formas, se han clasificado en términos de diámetro aerodinámico. De acuerdo a su diámetro, se agrupan en finas y gruesas. Las partículas finas son las de diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 μm , denominadas como PM_{2.5}. Otro grupo de partículas está constituido por aquellas cuyo diámetro aerodinámico se centra alrededor de las 10 micras, las cuales se denominan PM₁₀. Además, dentro de la clasificación, se tienen las partículas suspendidas totales, o PST, que se refiere a todas las partículas rodeadas por aire, en un determinado volumen de aire no perturbado (Morawska et al., 1999; Préndez et al., 2007).

La fracción de partículas respirables con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 μm (PM₁₀), penetran a diferentes profundidades del sistema respiratorio. Por otro lado, las partículas con diámetro aerodinámico igual o menor a 2.5 μm son 100% inhalables (PM_{2.5}). Las partículas más pequeñas de 0.5 μm pueden penetrar los mecanismos de defensa del sistema respiratorio y depositarse en los alvéolos pulmonares (Préndez, 1993; Cohen y Hering, 1995; Préndez et al., 2007).

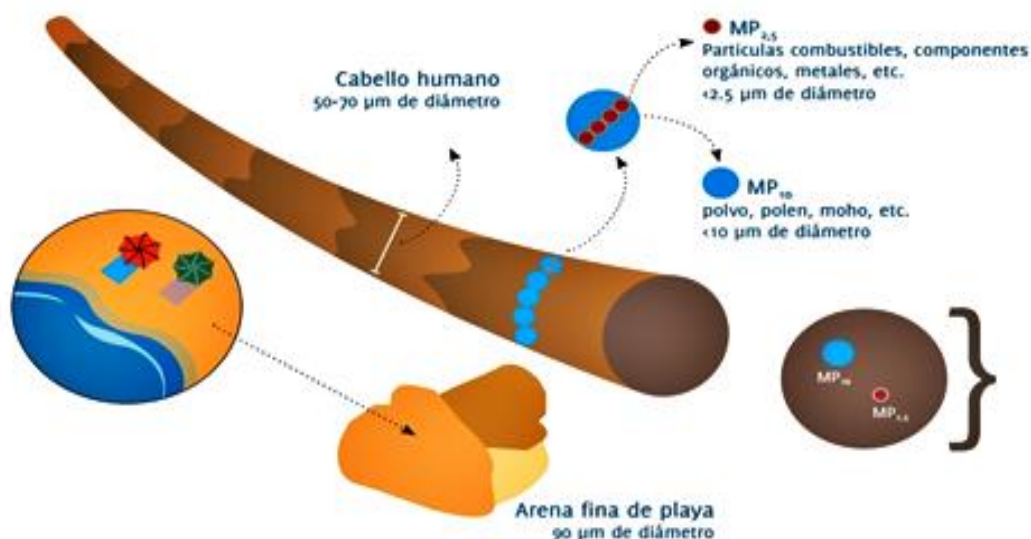


Figura 1. Ejemplificación del PM_{2.5}

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente, Chile (s.f)

Las PM_{2.5} se conocen comúnmente como partículas finas y contienen aerosoles secundarios, partículas de combustión y vapores metálicos y orgánicos re condensados, así como componentes ácidos. Éstas partículas se forman durante el proceso de combustión de los vehículos automotores. Los vehículos diésel y las motocicletas con motor de dos tiempos sin tecnologías de control de emisiones tienden a liberar más partículas finas y ultra finas. Además, las partículas se forman a partir de la transformación de emisiones gaseosas, como los óxidos de azufre y nitrógeno y los VOC, en contaminantes secundarios (Basté, 2013).

Entre otras fuentes de PM_{2.5} figuran la quema de madera, carbón, petróleo y combustibles gaseosos; la quema de residuos de carbón, residuos agrícolas y desechos sólidos municipales; las emisiones de cenizas volátiles de las centrales eléctricas; las actividades de fundición y mineras; las fábricas de asbestos; la industria metalúrgica; la industria cerámica; la industria del vidrio y la industria del cemento. Entre las fuentes no inducidas por el ser humano figuran los incendios forestales, las erupciones volcánicas, las tormentas de viento y de polvo, y el rocío salino (Basté, 2013).

5.2 Efectos en la salud por material particulado PM_{2.5}

Las pruebas relativas al material particulado suspendido en el aire y sus efectos en la salud pública coinciden en poner de manifiesto efectos adversos para la salud con las exposiciones que experimentan actualmente las poblaciones urbanas, tanto en los países desarrollados como en desarrollo (OMS, 2005). Anteriormente, epidemiólogos ambientales centraban sus estudios principalmente en partículas con un diámetro aerodinámico igual o menor que 10 μm (PM₁₀). A medida que incrementan los casos de enfermedades respiratorias y cardíacas, se presta cada vez más atención a la evaluación de la exposición de PM_{2.5} y su relación con los efectos cardiopulmonares (Goldberg et al., 2001; Janssen et al., 2002; Magari et al., 2002; Han & Naeher, 2005), esto es debido a que su origen es antropogénico en una alta proporción, puesto que las PM 2.5 en buena medida provienen de las emisiones de los vehículos diésel de las ciudades (Linares & Diaz, 2008). Desde el punto de vista fisicoquímico, las PM_{2.5} se pueden formar en el aire debido a que se estructuran indirectamente cuando los gases de la quema de combustibles de vehículos, de las centrales eléctricas y de otros procesos industriales, reaccionan con la luz solar y el vapor de agua (Spellman & Withing, 2014), actuando como principales componentes el sulfato, el nitrato, el carbono orgánico, y el carbono elemental; producidas por la oxidación atmosférica de SO₂, NO_x y COV (Aneja, Wang, & Tong, 2006).

El abanico de los efectos en la salud es amplio y se ve afectada toda la población, pero la susceptibilidad a la contaminación puede variar con la salud o la edad. Se ha demostrado que el riesgo de diversos efectos aumenta con la exposición, y hay pocas pruebas que indiquen un umbral por debajo del cual no quepa prever efectos adversos en la salud (OMS, 2005). No obstante, las evaluaciones de riesgo permiten dar soporte, con base científica, a la toma de decisiones por los responsables de la gestión de sitios con peligros o contaminantes que afecten la salud de las personas y el medio ambiente (Johnston, 2002; Hope, 2006; Brooks, 2009; Fundación Chile, s.f).

En términos de efectos en la salud, se sabe que entre más pequeñas sean las partículas, pueden penetrar con mayor facilidad hasta el interior de los pulmones, con posibles efectos tóxicos debido a sus características fisicoquímicas. Las PM₁₀ pueden entrar directamente al

aparato respiratorio y depositarse en sus diferentes regiones, mientras que las PM_{2.5} pueden llegar a la región alveolar (Zuk, Tzintzun, & Rojas, 2007). Las partículas suspendidas son capaces de interferir con uno o más mecanismos de defensa del aparato respiratorio, o actuar como vehículo de sustancias tóxicas absorbidas o adheridas a la superficie de la partícula. En varios estudios llevados a cabo en Estados Unidos y en Europa, se ha encontrado que la exposición prolongada a las partículas finas aumenta el riesgo de mortalidad por cáncer pulmonar y enfermedades cardiopulmonares (Dockery et al., 1993; Pope et al., 2002; Zuk, Tzintzun, & Rojas, 2007).

En general, diversos estudios científicos han relacionado la exposición a las PM_{2.5} con efectos en la salud, incluyendo agravación del asma, aumento de los síntomas respiratorios, como tos y respiración difícil o dolorosa, bronquitis crónica y reducción de la función pulmonar, entre otras consecuencias (Zuk, Tzintzun, & Rojas, 2007).

5.3 Evaluación de riesgo para contaminantes tóxicos del aire

La capacidad de una sustancia tóxica para representar un riesgo depende de dos componentes: de su toxicidad y del grado de exposición que la población de interés tiene a esta sustancia (Ize & Zuk, 2010). Según la U.S. EPA (1991), los contaminantes tóxicos del aire son aquellas sustancias que, si usted se expone a ellos, es decir, el contaminante tóxico entra en contacto con las barreras externas del cuerpo, podrían aumentar las posibilidades de experimentar problemas de salud.

La Agencia para el Registro de Sustancias Tóxicas y Enfermedades (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) de los Estados Unidos, mejor conocida como ATSDR por sus siglas en inglés, define la evaluación de riesgos como el proceso mediante el cual se recaba la información disponible sobre los efectos tóxicos de una sustancia química y se le analiza a fin de determinar el riesgo posible en relación con la exposición.

A nivel operativo, la ATSDR notifica a la Agencia de Protección Ambiental (United States Environmental Protection Agency), conocida como la U.S. EPA, la existencia de amenazas para la salud pública, de manera que ésta pueda desarrollar alguna intervención para mitigar

o prevenir la exposición y los efectos en la salud. A diferencia de la U.S. EPA, la ATSDR no es una agencia reguladora.

Los métodos de evaluación de riesgos que actualmente tienen amplia difusión son los desarrollados en los Estados Unidos por la U.S. EPA y la ATSDR. La primera desarrolla un método rigurosamente científico para evaluar el riesgo que puedan representar las sustancias en particular. La segunda desarrolló un método para evaluar una situación particular de riesgo causado por un lugar o sitio preciso que está contaminado generalmente con varias sustancias potencialmente tóxicas.

La U.S. EPA estableció cuatro pasos en el proceso de evaluación de riesgos, éstos pasos son:

1. Identificación del riesgo
2. Evaluación de la relación dosis-efecto
3. Evaluación de la exposición
4. Caracterización del riesgo

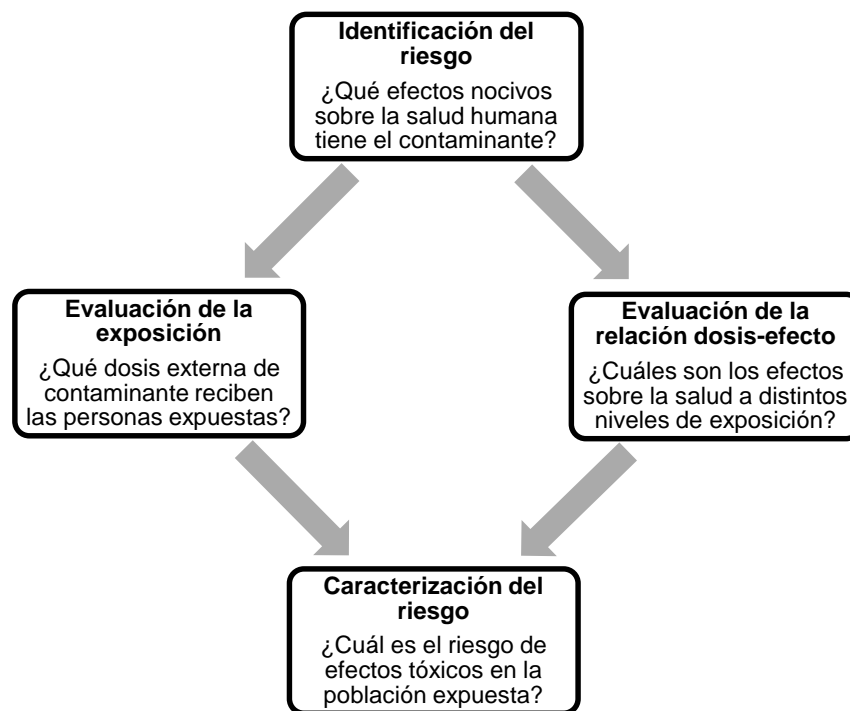


Figura 2. Etapas de la evaluación del riesgo.

Adaptado de U.S. EPA (1991)

5.3.1 Identificación del riesgo

La identificación de los peligros o identificación del riesgo, consiste en determinar los efectos indeseables que una sustancia es capaz de provocar. La caracterización toxicológica de los agentes químicos requiere la recopilación de datos sobre sus propiedades, obtenidos mediante técnicas diversas. Estas técnicas incluyen ensayos fisicoquímicos, estudios epidemiológicos, ensayos de toxicidad en animales y análisis estructura-actividad, es decir, la predicción de actividad tóxica basada en el análisis de la estructura química (Peña, 2001; Acevedo, 2006).

5.3.2 Estudios epidemiológicos

La Epidemiología consiste en el estudio de los factores que determinan la frecuencia y distribución de enfermedades en las poblaciones humanas. La descripción y análisis de las enfermedades, en el ámbito de la epidemiología, se realiza mediante el cómputo de la incidencia o la prevalencia. La incidencia es el número de nuevos casos de una enfermedad que se produce en un determinado periodo de tiempo. La prevalencia es el número de casos existentes de una enfermedad en una población en un momento determinado (Moreno Grau, 2003; Acevedo, 2006). Los estudios epidemiológicos constituyen la fuente más valiosa de información en la evaluación del riesgo toxicológico, simplemente porque sus conclusiones se han alcanzado mediante observaciones en seres humanos. Sin embargo, ésta ventaja se ve contrarrestada por la dificultad de obtener e interpretar los datos epidemiológicos (Acevedo, 2006).

En el caso concreto de los agentes cancerígenos, la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (International Agency for Research on Cancer), conocida como IARC por sus siglas en inglés, realiza reuniones periódicas de grupos de expertos para la evaluación de las evidencias epidemiológicas. Sólo en los casos en que dichos grupos de trabajo acuerdan que la evidencia es concluyente acerca de la relación causal, se clasifica como cancerígeno para humanos mediante su inclusión en el Grupo 1.

5.3.3 Ensayos en animales

La evaluación de riesgos toxicológicos puede basarse en los resultados obtenidos en ensayos en animales, siempre que no se disponga de estudios epidemiológicos o éstos no sean adecuados. La ventaja fundamental de los ensayos en animales es su realización en condiciones rigurosamente controladas, de forma que se puede establecer el nexo causal entre exposiciones al agente y la aparición del efecto de forma concluyente (Moreno Grau, 2003; Acevedo, 2006).

5.3.4 Propiedades físico-químicas

Las características fisicoquímicas influyen en la absorción del agente en el organismo, en su distribución en los distintos tejidos, en su biotransformación y degradación, y en consecuencia, desempeñan un papel fundamental en la identificación del riesgo (Acevedo, 2006).

5.3.5 Relaciones estructura-actividad

Los análisis estructura-actividad tienen como objetivo predecir el comportamiento de un agente químico en función de su estructura molecular, mediante el estudio de las características moleculares y los modos de acción biológicos, especialmente en relación con el comportamiento cancerígeno (Moreno Grau, 2003; Acevedo, 2006).

5.3.6 Metabolismo comparado y toxicocinética

Los estudios de absorción, distribución, biotransformación y excreción de agentes químicos se utilizan como herramienta para establecer comparaciones entre especies, para identificar rutas metabólicas a distintos niveles posológicos y para contrastar distintas rutas de exposición (Moreno Grau, 2003; Acevedo, 2006).

5.4 Evaluación de la relación dosis-efecto

La evaluación de la dosis-efecto es la estimación de la incidencia de un efecto cancerígeno o tóxico en función del nivel de exposición de una sustancia. La relación dosis-efecto se

establece mediante el análisis de la información toxicológica, del que se deduce el vínculo cuantitativo entre dosis y efectos adversos para la salud (U.S. EPA, 1998; Moreno Grau, 2003; Acevedo, 2006).

5.4.1 Datos toxicológicos utilizados

Los datos toxicológicos a partir de los que se obtienen los índices de toxicidad utilizados en la evaluación de riesgo pueden proceder de distintos tipos de estudios: estudios epidemiológicos, ensayos en animales de laboratorio, ensayos *in vitro* y relaciones estructura-actividad. La relevancia de la información obtenida en cada tipo de ensayo es diferente. La información más valiosa proviene de estudios en seres humanos, mientras que la proporcionada en ensayos *in vitro* y las relaciones estructura -actividad suelen considerarse información auxiliar (Moreno Grau, 2003; Acevedo, 2006).

5.4.2 Efectos no cancerígenos

El índice de toxicidad utilizado para evaluar los riesgos no cancerígenos es la dosis de referencia crónica, RfD. Este parámetro corresponde al estimado de una dosis de exposición que si ocurre a diario durante toda la vida es improbable que cause un riesgo significativo para la salud de las poblaciones expuestas (CEPIS/OPS, 2005).

La propia definición de la dosis de referencia crónica pone de relieve su objetivo, que es garantizar una protección suficiente para la población ante exposiciones a largo plazo de un agente químico. El uso de RfD crónica suele reservarse a la evaluación de riesgos para exposiciones entre 7 años y toda la vida, suponiendo una expectativa media de vida de 70 años (U. S. EPA, 1989; Acevedo, 2006).

Cada sustancia tiene su propia RfD específica; incluso una misma sustancia puede tener valores diferentes de RfD para la vía respiratoria y para la vía digestiva. El concepto de RfD se aplica especialmente para sustancias de acción sistémica, que se absorben y luego se distribuyen por el organismo. Para aquellos contaminantes del aire que ejercen acción tóxica local y para los cuales los niveles que causan efectos observables en humanos se definen en

función de su concentración en el aire en vez de la dosis, se aplica el concepto de “concentración de referencia” (RfC) (CEPIS/OPS, 2005).

Las sustancias con efectos no cancerígenos presentan en la curva dosis-respuesta (Ver Figura 1) una dosis en la cual aparece el primer individuo con un efecto adverso; ésta dosis se conoce como LOAEL (*lowest observed adverse effect level*), que es literalmente la dosis más baja utilizada en el estudio que causó un efecto dañino, o dicho de otra manera, la dosis que en la escala ascendente de dosis produce el primer caso con un efecto adverso. Inmediatamente antes del LOAEL se encuentra la dosis que no produce el efecto adverso, que se llama NOAEL (*no observed adverse effect level*) y corresponde al nivel más alto de dosis en el que no se observan efectos dañinos. Para fines prácticos, se necesita conocer el NOAEL más bajo obtenido en los estudios experimentales (el obtenido en la especie animal más sensible), si fue por inhalación o ingestión y el tipo específico de daño que se produjo; en su defecto hay que usar el LOAEL. Cuando se trabaja con concentración ambiental del tóxico en vez de dosis, el proceso para identificar el LOAEL y el NOAEL es el mismo, pero mediante una curva concentración-respuesta, como se ha hecho, por ejemplo, con los contaminantes clásicos del aire urbano (CEPIS/OPS, 2005).

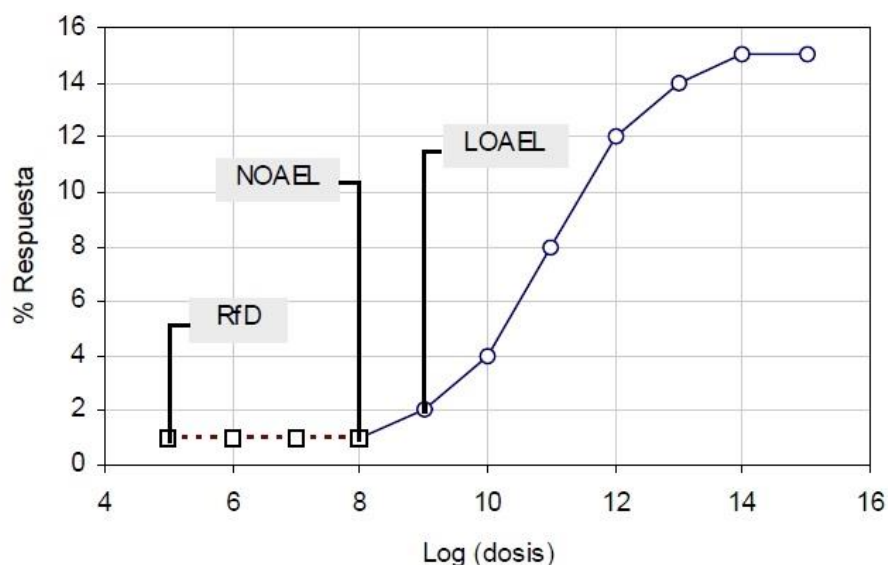


Figura 3. Curva de Dosis-Respuesta

Fuente: Acevedo (2006).

5.4.3 Efectos cancerígenos

Con las sustancias de tipo carcinogénico, un probable impacto biológico adverso se puede producir a cualquier dosis, incluso a dosis extremadamente bajas; hay un riesgo finito a concentraciones y a dosis muy bajas, las que no es posible medir con las técnicas de laboratorio disponibles. En la práctica, la exposición a cualquier concentración ambiental de un carcinógeno va a representar una posibilidad definida de desarrollar un cáncer según la concentración de la sustancia. El grado de inclinación, o sea, la pendiente de la curva dosis-respuesta del carcinógeno va a determinar la magnitud de dicha posibilidad, la pendiente establece el potencial carcinogénico de la sustancia. Para establecer la pendiente de la curva dosis-respuesta de un carcinógeno en el sector de las dosis bajas -que equivalen a los niveles habituales de exposición humana a carcinógenos en el ambiente general y que son muy difíciles de medirse tanto en estudios animales como epidemiológicos-, se recurre a la aplicación de modelos matemáticos que extrapolan a partir de datos de curvas reales obtenidas con dosis altas en animales experimentales o en exposiciones ocupacionales, para establecer la inclinación en el área de las dosis muy bajas. Esto permite establecer lo que se llama Factor de Potencia Carcinogénica (FPC). Este valor sin dimensión, que es específico para cada carcinógeno e incluso para cada vía de exposición, respiratoria o digestiva, está referido para cada mg de la dosis; al multiplicar el FPC por la dosis del carcinógeno localmente medida en los humanos se obtiene la magnitud del riesgo que tiene un individuo de la comunidad expuesta de desarrollar el cáncer asociado (CEPIS/OPS, 2005).

Mediante modelos toxicocinéticos se puede calcular el valor de la concentración del carcinógeno en el aire y es equivalente al FPC, valor que se llama Unidad de Riesgo (UR) y que está referido para cada μg del carcinógeno por m^3 de aire. Cuando existen cifras representativas y confiables de la concentración promedio de un carcinógeno en el aire, se multiplica dicha concentración, expresada en μg por m^3 , por el valor de la UR que el carcinógeno tenga establecida, obteniéndose de este modo el riesgo individual (CEPIS/OPS, 2005).

5.5 Evaluación de la exposición

La evaluación de la exposición implica describir cuantitativamente y cualitativa el contacto del individuo con un agente específico (exposición), así como el ingreso (dosis) al organismo. Si bien existen diferentes tipos de exposiciones, todas ellas tienen elementos comunes: grupos de individuos expuestos a concentraciones determinadas en períodos de tiempo establecidos; dosis de ingreso al organismo, y la contribución de las fuentes emisoras, rutas, vías y factores individuales a la exposición y a la dosis (UAP, 2015). En este proceso se sigue una secuencia de pasos para entender integralmente el fenómeno de exposición y, muy importantemente, para controlarlo (CEPIS/OPS, 2005).

La evaluación de la exposición consta de las siguientes etapas:

- 1.- Caracterización del escenario de exposición.
- 2.- Identificación y selección de la ruta de exposición relevante.
- 3.- Cuantificación de la exposición correspondiente a la ruta ambiental seleccionada

5.5.1 Caracterización del escenario de exposición

El escenario de exposición debe definirse mediante la recopilación de datos sobre el medio físico y la población existente en la zona de estudio y sus alrededores. El escenario de exposición relaciona entre sí los contaminantes y las poblaciones potencialmente expuestas. La caracterización de estas poblaciones requiere, en primer lugar, de la determinación de la distancia y dirección de las poblaciones potencialmente expuestas con respecto a la fuente. Se debe prestar especial atención a aquellas personas que trabajen o residan en las inmediaciones de la propia fuente, ya que son los receptores con mayor potencial de exposición (Moreno Grau, 2003; Acevedo, 2006).

5.5.2 Identificación de la ruta de exposición

La identificación de las rutas ambientales de exposición requiere la consideración conjunta de las fuentes de las fuentes de contaminación (primarias y secundarias), los tipos de contaminantes emitidos, el comportamiento ambiental del contaminante (transporte,

distribución y transformación) y la localización de los receptores sensibles (Moreno Grau, 2003; Acevedo; 2006).

Sólo se consideran como significativas y merecen ser evaluadas las rutas completas de exposición que produzcan exposiciones efectivas, es decir, que el tóxico además de llegar a hacer contacto con el individuo encuentra la forma de ingresar en el interior del organismo. Se pueden considerar como justificaciones válidas para eliminar el análisis de una ruta completa las siguientes (Peña, 2001; Acevedo; 2006):

- 1.- La exposición resultante es mucho menor por esta ruta que por otra que involucra el mismo medio y el mismo punto de contacto.
- 2.- La magnitud de la exposición potencial es baja o es muy poco probable que se dé la exposición y los riesgos asociados a la exposición no son altos.

5.5.3 Cuantificación de la exposición

La cuantificación de la exposición consiste en determinar el patrón local de magnitud, frecuencia, duración y vía por la cual ocurre la exposición (SDE/OPS, 2006). Para ello, se incurre a los cálculos de concentración del contaminante y dosis de exposición.

5.5.3.1 Concentración del contaminante

La concentración es la cantidad (masa) de una sustancia o contaminante que está presente en un medio tal como el aire, agua, suelo o una muestra biológica tal como un alimento, leche materna, sangre, orina por unidad de volumen o masa. Aun cuando hay ocasiones en que el agente puro entra directamente en contacto con el individuo, lo habitual es que el contacto ocurra a través de un medio que contiene al agente diluido en diferentes concentraciones. Se define concentración de la exposición, a la concentración del agente en el medio de transporte que entra en contacto con el organismo humano (mg/l; mg/Kg.; mg/m³) (SDE/OPS, 2006).

5.5.3.2 Dosis de exposición al contaminante

La dosis externa es la cantidad de contaminante con la que los receptores entran en contacto por unidad de tiempo y peso corporal. Se expresa en miligramos de compuesto en el punto de exposición, por kilogramo de peso corporal y día (mg/kg·día). La dosis externa, en el marco de la evaluación de riesgo, suele denominarse ingesta, ingreso o incorporación. El término ingesta se utiliza para todas las vías de exposición, a pesar de que sugiera únicamente la vía oral (Moreno Grau, 2003; Acevedo, 2006).

La dosis absorbida es la parte de la dosis externa que penetra en el torrente sanguíneo y queda disponible para su distribución en los distintos órganos. La dosis calculada normalmente en la evaluación de riesgos es la dosis externa, excepto para la exposición cutánea, en la que se calcula el grado de absorción.

5.6 Caracterización del riesgo

La etapa final de la evaluación del riesgo consiste en la integración de la información obtenida en la identificación del riesgo, la relación dosis-efecto y la evaluación de la exposición, con el objeto de predecir el riesgo de padecer probables efectos adversos por los individuos o las poblaciones expuestas. El fin último que se persigue es facilitar la toma de decisiones tendentes a reducir dichos riesgos a niveles tolerables (Moreno Grau, 2003; Acevedo 2006).

La caracterización del riesgo comienza por una evaluación de la información recopilada en las fases anteriores, con el doble objetivo de verificar que se ha obtenido toda la información necesaria y de comprobar la consistencia interna de los resultados obtenidos (Moreno Grau, 2003; Acevedo 2006).

Los datos necesarios para la caracterización del riesgo son los siguientes:

- 1.- La concentración del contaminante y la dosis externa de exposición a la sustancia.
- 2.- Las rutas medioambientales completas y la vía de exposición.

3.- La información sobre la toxicidad del contaminante y los resultados de la relación dosis-respuesta.

5.6.1 Valoración de los resultados

La valoración de los resultados consiste en juzgar el producto de la cuantificación del riesgo aplicando criterios que permitan distinguir las situaciones de riesgo tolerable y de riesgo intolerable, en que sea necesario adoptar medidas necesarias para disminuir el nivel de exposición (Moreno Grau, 2003; Acevedo, 2006). Los criterios utilizados en la práctica habitual de la evaluación del riesgo son los siguientes:

1.- Efectos cancerígenos: El límite tolerable del incremento del riesgo cancerígeno individual es de 1×10^{-6} , es decir, un incremento de la probabilidad de padecer cáncer de una unidad por millón mientras que el límite tolerable del incremento del riesgo cancerígeno acumulado suele fijarse en 1×10^{-5} (U.S. EPA, 1989; Acevedo; 2006).

2.- Efectos no cancerígenos: El Índice de Peligro debe ser inferior a la unidad y el Margen de Exposición superior a la unidad para la vía de exposición (CEPIS/OPS, 2005).

6. Metodología

6.1 Área de estudio

6.1.1 Localización

Este proyecto de investigación se desarrolló en el área urbana de la ciudad de Barranquilla, capital del departamento del Atlántico, en Colombia. Se seleccionaron tres (3) estaciones estratégicas sobre vías con alto tráfico vehicular de la ciudad para realizar el muestreo, tales como:

- Carrera 45 con la calle 39 (Estación Centro)
- Carrera 46 con la calle 90 (Estación Autónoma)
- Carrera 43 con la calle 72 (Estación Calle 72)

Asimismo, se contempló un *blanco* como estación de monitoreo para el estudio, siendo éste el Parque Jardín Botánico, considerado como el pulmón verde de la ciudad al ser el parque más grande de Barranquilla con un área 54.833 m². Ésta reserva forestal se encuentra ubicada entre las calles 44 y 40B con la carrera 13C y la carrera 8H

La selección de las vías con alto tráfico vehicular se hace teniendo en cuenta información provista por la Secretaria de Movilidad de la ciudad de Barranquilla. Se conoce igual que, al 30 de junio del 2016, el parque automotor activo de Barranquilla es de 165.472 vehículos (Secretaria de Movilidad, 2016).

A continuación, se señalan las distintas ocupaciones laborales en cada una de las estaciones de monitoreo y la ubicación de éstas en un plano del área de estudio (ver Figura 2):

- Carrera 45 con la calle 39: policías de tránsito, vendedores de lotería, vendedores de jugos y comidas, vigilantes, vendedores de minutos, auxiliares de fotocopadoras.
- Carrera 46 con la calle 90: vendedores de jugos, vendedores de minutos,

- Carrera 43 con la calle 72: vendedores de jugos, limpia vidrios, vendedores de periódicos, vendedores de frutas y flores, vendedores de revistas, vendedores de accesorios en acero, vendedores de bebidas energéticas, vendedores de ropa y comida en locales comerciales con puertas abiertas.
- Parque Jardín Botánico: Policías, jardineros.

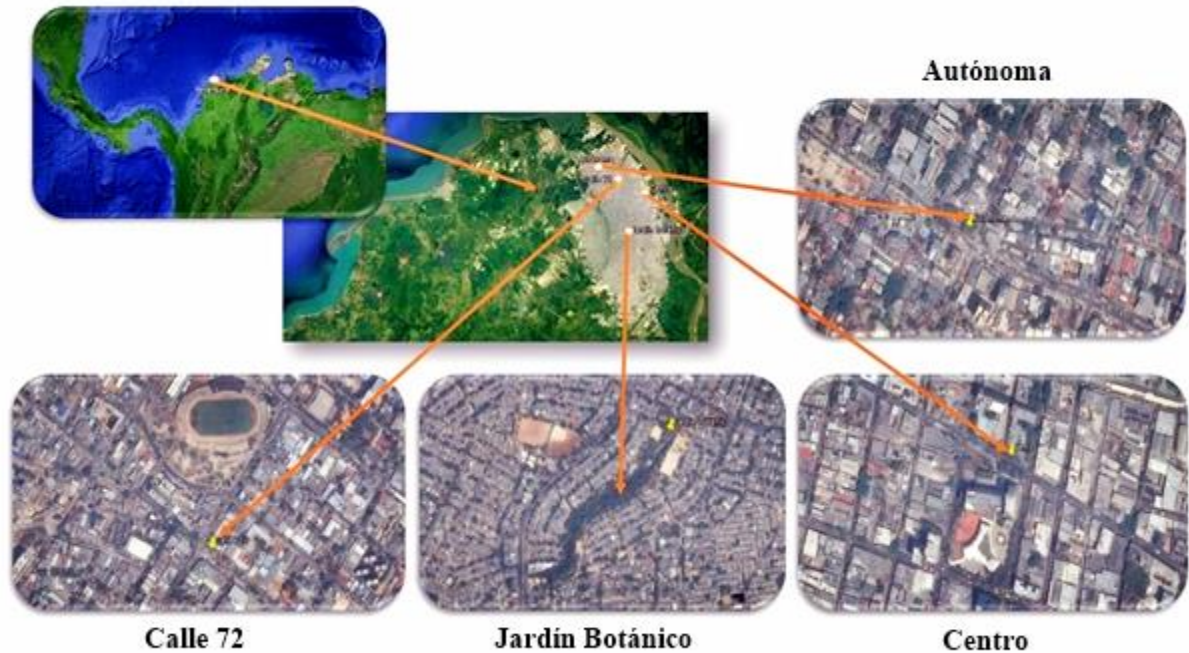


Figura 4. Área de estudio.

Fuente: Google Earth (2016).

6.1.2 Condiciones climatológicas

Se analizan las variables meteorológicas temperatura, precipitación, velocidad del viento y humedad en el área de estudio (Ver Figura 5.) evaluando las medias mensuales de la ciudad de Barranquilla. De acuerdo a la información suministrada por el IDEAM, las mayores precipitaciones se extienden de agosto con 110 mm a octubre con 162.6 mm, sin embargo, se registra una corta temporada de aumento de lluvias en el mes de mayo, y una segunda, pero de menor intensidad en los meses de junio y julio. La temporada seca ocurre entre diciembre y abril.

Durante todo el año los regímenes de velocidad media del viento en la ciudad de Barranquilla están determinados por las oscilaciones del sistema de alta presión de las Azores y las fluctuaciones de la Zona de Convergencia Intertropical sobre el área, las cuales de diciembre a marzo presentan posiciones propicias para que se presente flujo constante de viento en la ciudad de Barranquilla ocasionando las mayores velocidades del año, según los registros multianuales del IDEAM oscilan entre 16.2 y 22 km/h, así mismo, en Barranquilla predominan dos flujos con direcciones noreste (42.7%) y norte (25%), con predominio de vientos moderados. También se presentan frecuencias relativas al Este, Sureste y Sur, con 5.8%, 6.1% y 6.1%, respectivamente. (CIOH, 2007)

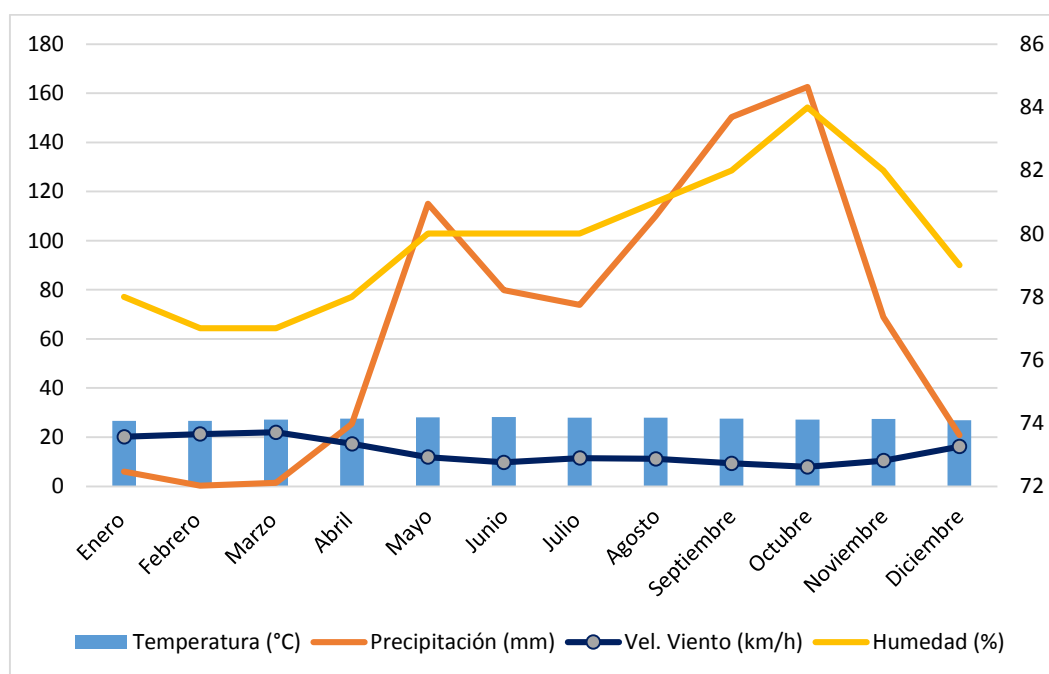


Figura 5. Variables meteorológicas en la ciudad de Barranquilla

Fuente: Datos suministrados por el IDEAM.

El máximo valor de temperatura promedio se encuentra en el mes de junio con un registro de 28.2 °C, mientras que la mínima, en enero, no supera los 26.6 °C. El promedio anual de la temperatura en la ciudad de Barranquilla es de 27.4°C.

Con respecto a la humedad relativa, la capital del Atlántico presenta una humedad alta por estar en cercanías al Mar Caribe y a orillas del río Magdalena, teniendo una media de humedad relativa de 77.8 % para la temporada seca y un 82.3% para la temporada de lluvias.

6.2 Monitoreo de PM_{2.5}

6.2.1 Tratamiento de muestras

Durante un periodo de 24 horas, se colocaron en un desecador con gel de silicio, 12 esponjas de poliuretano (donde quedan atrapadas las partículas de fracción gruesa) y 12 filtros de politetrafluoroetileno (teflón) de 37 mm (donde se adhieren las partículas finas). Luego de las 24 horas, en una balanza Adventurer Pro® marca OHAUS de referencia AV264 con una repetibilidad (desviación estándar) de 0,0001 g, se masaron 3 veces cada esponja y cada filtro en una placa de Petri (previamente tarada) para promediar dichos valores y así obtener el peso inicial de cada medio filtrante. Para obtener el peso final obtenido después del muestreo se siguieron las mismas instrucciones descritas anteriormente. A su vez, se calibró el caudal de las bombas personales de muestreo de aire TUFF™ marca Casella de referencia Standard con ayuda de un rotámetro tetraCal® marca BGI Instruments. El caudal establecido fue de 3.5 L/min, idóneo para muestrear material particulado.

6.2.2 Toma de muestras

Se efectuaron dos campañas de monitoreo (un día hábil y un día no hábil) para cada una de las estaciones seleccionadas. Los auxiliares de campo (las dos personas que realizan el proyecto de investigación) se asentaron en las estaciones seleccionadas por 8 horas, duración máxima legal diaria de la jornada ordinaria de trabajo en Colombia, para imitar las distintas ocupaciones laborales de cada una de las estaciones de monitoreo. La toma de las muestras se llevó a cabo en la jornada de 8:00 am a 5:00 pm (incluyendo 1 hora de descanso en donde se pausa el equipo). El muestreo se realizó del 2 al 5 de Julio de 2016.

Para la recolección de información en campo se utilizaron 2 bombas personales de muestreo de aire TUFF™ marca Casella de referencia Standard. La bomba TUFF™ van conectada a un recolector de muestras, a través de un tramo de tubo. Las bombas TUFF™ son llevadas en el cinturón, el porta-filtro, sin embargo, debe ubicarse en la zona de respiración (cuello) para una muestrea válida. El porta-filtro lleva en su interior una esponja visible de poliuretano y un filtro de teflón de 37 mm.



Figura 6. Bomba personal de muestreo de aire TUFF.

Fuente: Casella.

Después de finalizado cada muestreo, las esponjas y los filtros fueron almacenadas en bolsas de plástico herméticas para su posterior análisis gravimétrico en el laboratorio de CITA de la Universidad de la Costa. La temperatura y presión promedio del laboratorio fue de 27.7 °C y 754 mmHg, respectivamente.

6.3 Análisis de las muestras

6.3.1 Cuantificación de la concentración de PM_{2.5}

Actualmente, el gran avance tecnológico ha permitido la medición directa de la exposición individual a los contaminantes en el aire. Para calcular la concentración del material particulado inhalable se emplea la siguiente ecuación:

$$C = \frac{(W_2 - W_1)}{Q \times T}$$

Donde,

C: Concentración de PM_{2.5} (mg/m³)

W1: es el peso del filtro antes del muestreo (mg)

W2: es el peso del filtro con la muestra después del muestreo (mg)

Q : Caudal de aire de referencia (m^3/seg)

T : Tiempo de muestreo (seg)

6.3.2 Determinación de la dosis de exposición a $\text{PM}_{2.5}$

El cálculo de la dosis de exposición se basa en los datos de concentración de contaminante en el punto de contacto, frecuencia y duración del contacto (Acevedo, 2006). La ecuación utilizada para el cálculo de la dosis de exposición a $\text{PM}_{2.5}$ es la siguiente:

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW} \quad (1)$$

Donde,

D : Dosis de exposición ($\text{mg}/\text{kg-día}$)

C : Concentración de $\text{PM}_{2.5}$ (mg/m^3)

IR : Tasa de inhalación ($\text{m}^3/\text{día}$)

- Mujer: $11,3 \text{ m}^3/\text{día}$
- Hombre: $15,2 \text{ m}^3/\text{día}$

EF : Factor de exposición (Sin unidad)

BW : Peso corporal promedio para adulto (70kg)

En muchos casos, el factor de exposición (EF) será igual a 1 en representación de una exposición diaria al contaminante. Sin embargo, la exposición a un contaminante se puede producir de forma intermitente o irregular. Para estos tipos de exposiciones, el EF se determina de la siguiente manera:

$$EF = \frac{D \times W \times Y}{AT} \quad (2)$$

Donde,

EF : Factor de Exposición (Sin unidad)

D : Días de exposición durante una semana (Días/semana)

W: Semanas de exposición durante un año (Semanas/año)

Y: Número de años de exposición (Años)

AT: Es el periodo promedio el cual se recibe la dosis de exposición ($Y \times 365$ días/año)

6.3.3 Estimación del riesgo de la población a PM_{2.5}

6.3.3.1 Cuantificación del riesgo

En la etapa de la caracterización del riesgo, se precisa calcular el riesgo asociado a la sustancia para la ruta medioambiental de exposición, procedimiento separadamente para sustancias cancerígenas y no cancerígenas (Moreno Grau, 2003; Acevedo, 2006). El estudio de las sustancias tóxicas se divide entre las que producen efectos carcinogénicos y las que no lo hacen. Las primeras, es decir las carcinogénicas, son sustancias sin umbral de detección, dado que en cualquier cantidad representan un riesgo para la salud humana. Las segundas, presentan niveles umbrales por encima de los cuales aparecen los efectos sobre el organismo humano o animal (Caro & Uribe, 2008).

6.3.3.1.1 Efectos cancerígenos

Para cuantificar el riesgo cancerígeno del PM_{2.5} se utiliza un factor denominado Factor de Potencia Carcinogénica (FPC) u otro factor denominado Unidad de Riesgo (UR). El FPC es una dosis (mg/kg/día) y la UR es una concentración (mg/m³). Para calcular el riesgo de cáncer, se evalúa el riesgo individual y después se procede a estimar el riesgo poblacional de la siguiente forma:

- Se calcula el Riesgo Individual:

$$\text{Riesgo Individual} = \text{UR (mg/m}^3\text{)} \times \text{Concentración medida de PM}_{2.5} \text{ (mg/m}^3\text{)}$$

y/o

$$\text{Riesgo Individual} = \text{FPC (mg/kg/día)} \times \text{Dosis de exposición medida (mg/kg/día)}$$

El valor del riesgo individual habitualmente es una cifra muy pequeña que refleja las posibilidades personales de desarrollar el cáncer del orden de diez milésimas o cien milésimas (CEPIS/OPS, 2005). Los factores FPC y UR han sido estimados para unas cuantas sustancias¹ y pueden obtenerse del banco de datos del programa Sistema Integrado de Información de Riesgos (*Integrated Risk Information System*) de la U.S. EPA, mejor conocido como IRIS por sus siglas en inglés, o de la información bibliográfica de la ATSDR.

- Se calcula el Riesgo Poblacional:

Riesgo Poblacional = Riesgo Individual x Población expuesta

El valor del riesgo poblacional obtenido representa un escenario hipotético que debe interpretarse como el número de casos con cáncer que aparecería en una población en el supuesto de que todos sus miembros estuvieran permanentemente expuestos de por vida a la concentración del carcinógeno encontrada en esa comunidad. El riesgo poblacional es una proyección probabilística de la incidencia del efecto en la población expuesta de por vida (CEPIS/OPS, 2005).

6.3.3.1.2 Efectos no cancerígenos

En la práctica no todos los contaminantes son cancerígenos. Por lo tanto, para este tipo de contaminantes la estimación del riesgo se basa en los siguientes dos indicadores:

- Uno es el Índice de Peligro (IP), en el que se compara la dosis de exposición personal medida y el valor de la Dosis de Referencia (DRf) que tiene la sustancia para la vía respiratoria:

$$IP = \frac{\text{Dosis de exposición medida } \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} - \text{día} \right)}{\text{DRf } \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} - \text{día} \right)}$$

¹ La U.S. EPA no ha establecido para el material particulado valores de referencia debido a la mezcla compleja de sus componentes, es por ello que la caracterización del riesgo se basa en la información provista por los valores de referencias del *diesel engine exhaust* (emisiones de motores diésel).

El IP denota seguridad en las condiciones locales de exposición cuando resulta en un valor de uno o menor de uno, o sea, se está en o por debajo de la dosis establecida como límite seguro, la DRf. Al crecer el valor progresivamente sobre uno, significa que la exposición local está incrementándose a niveles peligrosos que cada vez aumentan la posibilidad de que aparezcan los efectos adversos en la población (CEPIS/OPS, 2005)

- El otro indicador es el Margen de Exposición (ME), que compara el valor del $NOAEL_{HEC}$ (*no observed adverse effect level human equivalent concentration*) con la concentración de exposición personal medida:

$$ME = \frac{NOAEL_{HEC} (mg/m^3)}{Concentración\ medida (mg/m^3)}$$

El ME es una imagen inversa a la del IP, mientras más grande el valor del ME por encima de uno, más amplio es el margen de seguridad y menor la posibilidad de que aparezcan los efectos en la comunidad (CEPIS/OPS, 2005). Los factores de NOAEL han sido estimados para unas cuantas sustancias² y pueden obtenerse del banco de datos del programa IRIS o de la información bibliográfica de la ATSDR.

6.3.4 Análisis e interpretación de los resultados

En este trabajo de investigación, los resultados obtenidos de las concentraciones de material particulado se representaron por medio de un gráfico de columnas apiladas de Microsoft Excel donde se muestra la relación de las fracciones finas y gruesas de cada muestreo, comparando la contribución de cada una de ellas con el total de factores como el Tipo de Día y Estación.

Por otro lado, para realizar comparaciones estadísticas entre las dosis de exposición de un hombre y una mujer que laboren en cercanías a las vías de alto tráfico vehicular escogidas, en primer lugar, se utilizó el software Statgraphics Centurion XVI en donde se comprobó

² La U.S. EPA no ha establecido para el material particulado valores de referencia debido a la mezcla compleja de sus componentes, es por ello que la caracterización del riesgo se basa en la información provista por los valores de referencias del *diesel engine exhaust* (emisiones de motores diésel)

mediante la prueba de Shapiro-Wilk con un 95% de confianza, la distribución normal de los datos, la cual permitió desarrollar un análisis de la varianza (ANOVA) jerarquizado, con un 95% de confianza, teniendo en cuenta factores como el Tipo de Día, Estación y Género, siendo la Dosis la variable dependiente Finalmente, con la estimación del riesgo de la población a $PM_{2.5}$, los resultados se incorporaron en gráficos de columnas de Microsoft Excel con líneas horizontales como límites seguros en el Índice de Peligro y Margen de Exposición para los riesgos no cancerígenos.

En cuanto al riesgo cancerígeno, los resultados se evalúan en torno a los casos de cáncer que aparecerían en la población de Barranquilla.

7. Resultados

7.1 Concentración de PM_{2.5}

En la Tabla 1 se observan las concentraciones de material particulado acorde a su tamaño (finas y gruesas) en las estaciones de monitoreo, durante las 8 campañas de monitoreo en los días hábiles y no hábiles.

Tabla 1. Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de partículas finas y gruesas

Estación	Tipo de día	PM _{2.5}	PM ₁₀
Autónoma	Día hábil	178,58	178,58
Calle 72		238,10*	297,63
Centro		178,58	357,16*
Jardín Botánico		119,05~	119,05~
Autónoma	Día no hábil	119,05	119,05
Calle 72		178,58*	238,10*
Centro		119,05	178,58
Jardín Botánico		59,52~	59,52~

*Valor máximo en el monitoreo. ~Valor mínimo en el monitoreo.

Fuente: Autores.

Para la fracción fina (PM_{2.5}) nuestro objeto de estudio, en el día hábil, el máximo valor se presenta en la estación de monitoreo de la Calle 72 con un resultado de $238,10\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otra parte, las partículas gruesas obtuvieron mayor concentración en la estación del Centro con un resultado de $357,16\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el mínimo para ambos tamaños de partículas, se reporta en la estación del Jardín Botánico, con una concentración de $119,05\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para la jornada del día no hábil, tanto para la fracción fina y gruesa de partículas, el mínimo reportado es en la estación del Jardín Botánico con un resultado de $59,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Desde otro ángulo, el máximo para partículas finas fue en la Calle 72 con $178,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y, para partículas gruesas, una concentración de $238,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en esa misma estación.

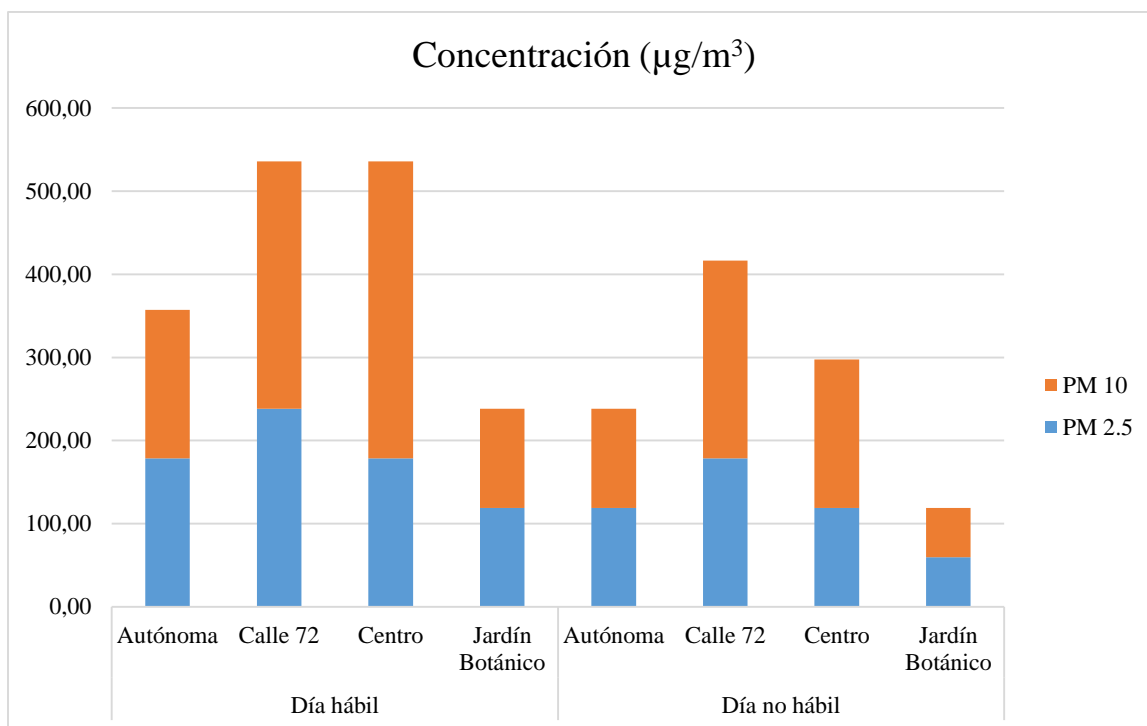


Figura 7. Concentración de partículas finas y gruesas.

Fuente: Autores

En la Figura 7 se presentan los resultados de las concentraciones de partículas (finas y gruesas) de acuerdo a la estación y jornada de día hábil o día no hábil.

Al realizar una comparación general de las concentraciones reportadas, se observa que se retuvieron mayor número de partículas de fracción gruesa que de partículas finas. Sin embargo, si se desprecia su tamaño, se puede constatar que en el día hábil las estaciones de monitoreo de la Calle 72 y la del Centro tuvieron la misma concentración de material particulado, obteniendo las concentraciones máximas en ambos tipos de días. Además, se rectifica que en la estación de monitoreo del Jardín Botánico, hubo la menor exposición a concentración de material particulado, tanto $\text{PM}_{2,5}$ como PM_{10} , de las dos clases de días.

7.2 Dosis de exposición a PM_{2.5}

En la Tabla 2 observan las dosis de exposición de un hombre y una mujer a material particulado PM_{2.5} en las estaciones de monitoreo, durante las 8 campañas de monitoreo en los días hábiles y no hábiles.

Tabla 2. Dosis de exposición de un hombre y una mujer a material particulado PM_{2.5}

Tipo de día	Género	Estación	Dosis de exposición (mg/kg-día)
Día hábil	Hombre	Jardín Botánico	0,01835
	Mujer	Jardín Botánico	0,01364~
	Hombre	Autónoma	0,02753
	Mujer	Autónoma	0,02046
	Hombre	Calle 72	0,03671*
	Mujer	Calle 72	0,02728
	Hombre	Centro	0,02753
	Mujer	Centro	0,02046
Día no hábil	Hombre	Jardín Botánico	3,61881x10 ⁻³
	Mujer	Jardín Botánico	2,69030x10 ⁻³ ~
	Hombre	Autónoma	7,23824x10 ⁻³
	Mujer	Autónoma	5,38106x10 ⁻³
	Hombre	Calle 72	0,01085*
	Mujer	Calle 72	8,07181x10 ⁻³
	Hombre	Centro	7,23824x10 ⁻³
	Mujer	Centro	5,38106x10 ⁻³

*Valor máximo en el monitoreo. ~Valor mínimo en el monitoreo.

Fuente: Autores

Para este componente se desarrolló un análisis estadístico a partir de los resultados obtenidos en la Tabla 2. Para ello, en primer lugar, se determinó mediante la prueba de Shapiro-Wilk que los datos se encontraran distribuidos normalmente (ver Anexos). Por lo tanto, se procede a desarrollar un análisis de varianza jerarquizado o anidado, teniendo en cuenta los distintos

factores (Tipo de día, Estación y Género) y la variable dependiente (Dosis de exposición) con un 95% de confianza.

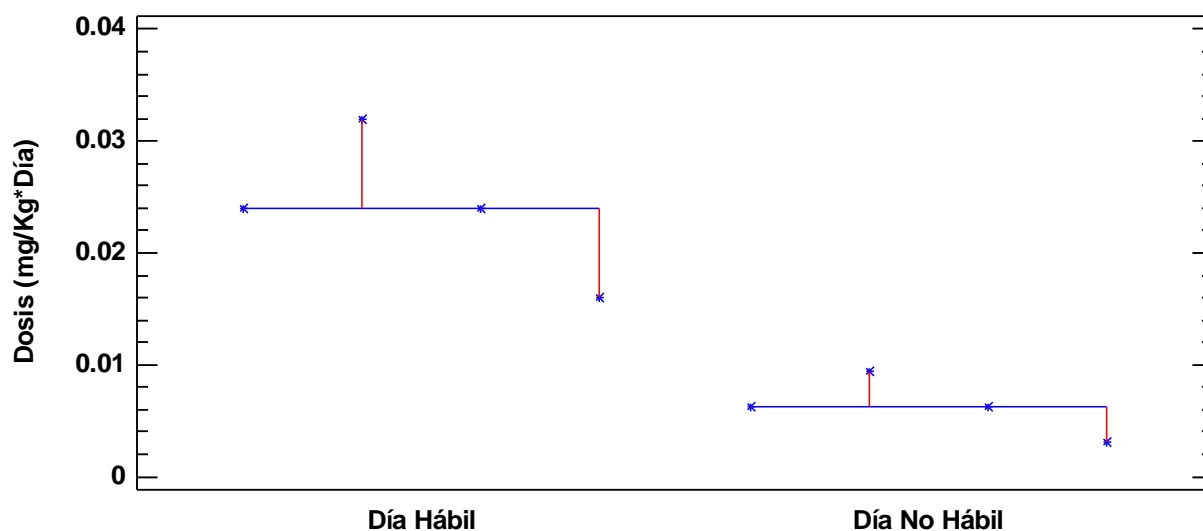


Figura 8. ANOVA jerarquizado de acuerdo al Tipo de Día y la Estación.

(—) Media aritmética del Tipo de Día. (*) Media aritmética de la Estación.

Fuente: Autores

En la Tabla 3 se analiza que existen diferencias estadísticamente significativas entre la media de los dos Tipos de Días, ya que el valor de P es inferior a 0,05 Además, existe una varianza considerable de la estación ubicada en la Calle 72 con respecto a la media del día hábil.

Tabla 3. ANOVA para la dosis.

ANOVA	
Factor	Valor de P
Tipo de día	0,0000
Estación	0,5671
Género	0,4150

Fuente: Autores

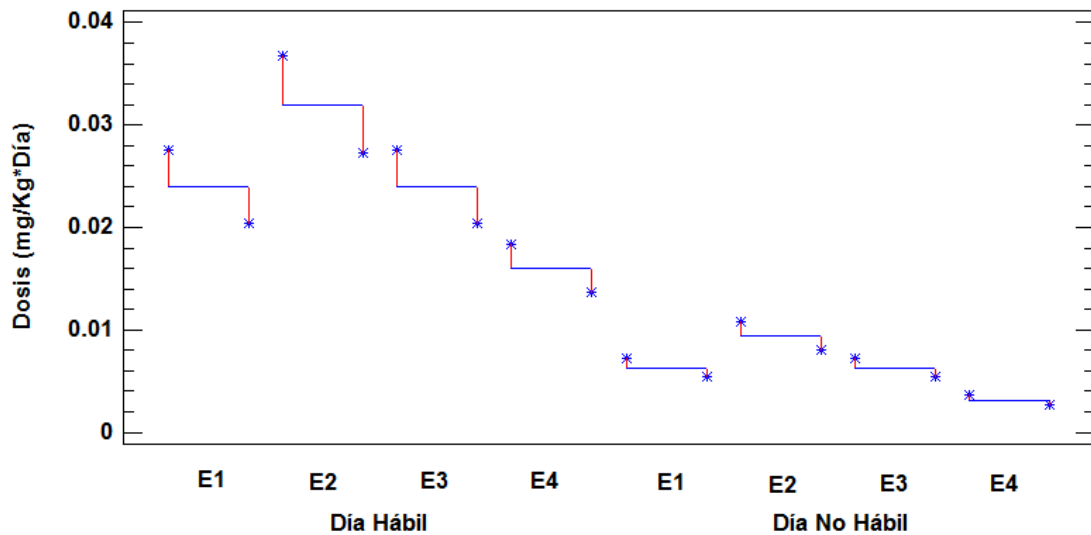


Figura 9. ANOVA jerarquizado de acuerdo al Tipo de Día, Estación y Género.

(E1) Autónoma; (E2) Calle 72; (E3) Centro; (E4) Jardín Botánico.

(—) Media aritmética de la Estación; (*) Media aritmética del Género

Fuente: Autores

De acuerdo a la Figura 9 se observa que no existen diferencias significativas entre la media de los niveles del Género (Hombre y Mujer) ni de la Estación, ya que se obtuvieron valores de P superiores a 0.05. Cabe destacar que la estación que presentó una media superior con respecto al resto fue aquella ubicada en la Calle 72 (E2) con una dosis de 0,03671 mg/kg-día para hombres y 0,02728 mg/kg-día para mujeres en el Día Hábil. Sin embargo, un hombre que labore en la Autónoma (E1) o en el Centro (E3) tiene una dosis de exposición mayor (0,02753 mg/kg-día) que la mujer que trabaje en la Calle 72 (E2). Por otra parte, la estación que tuvo una media inferior con relación al resto fue en el Jardín Botánico (E4) con una dosis de 0,002690 mg/kg-día para mujeres y 0,003618 mg/kg-día para hombres en el Día No Hábil.

7.3 Riesgo de la población a PM_{2.5}

7.3.1 Estimación del riesgo cancerígeno

En la Tabla 4 se observan los resultados del Riesgo Individual estimado de acuerdo al Tipo de Día (hábil y no hábil), teniendo en cuenta la Unidad de Riesgo (UR) del contaminante³ (mg/m³) y la concentración de material particulado PM_{2.5} medida en cada estación de muestreo, para una población estimada de 10000 personas.

Tabla 4. Riesgo individual de contraer cáncer de pulmón por exposición a PM_{2.5}.

Riesgo Individual		
Tipo de Día	Estación	Casos de cáncer de pulmón ~
Día hábil	Autónoma	536
	Calle 72	714
	Centro	536
	Jardín Botánico	357
Día no hábil	Autónoma	357
	Calle 72	536
	Centro	357
	Jardín Botánico	178

~ Posibilidades personales de desarrollar el cáncer en una población de 10.000 personas

Fuente: Autores.

³ Valor de referencia del *diesel engine exhaust* (emisiones de motores diésel).

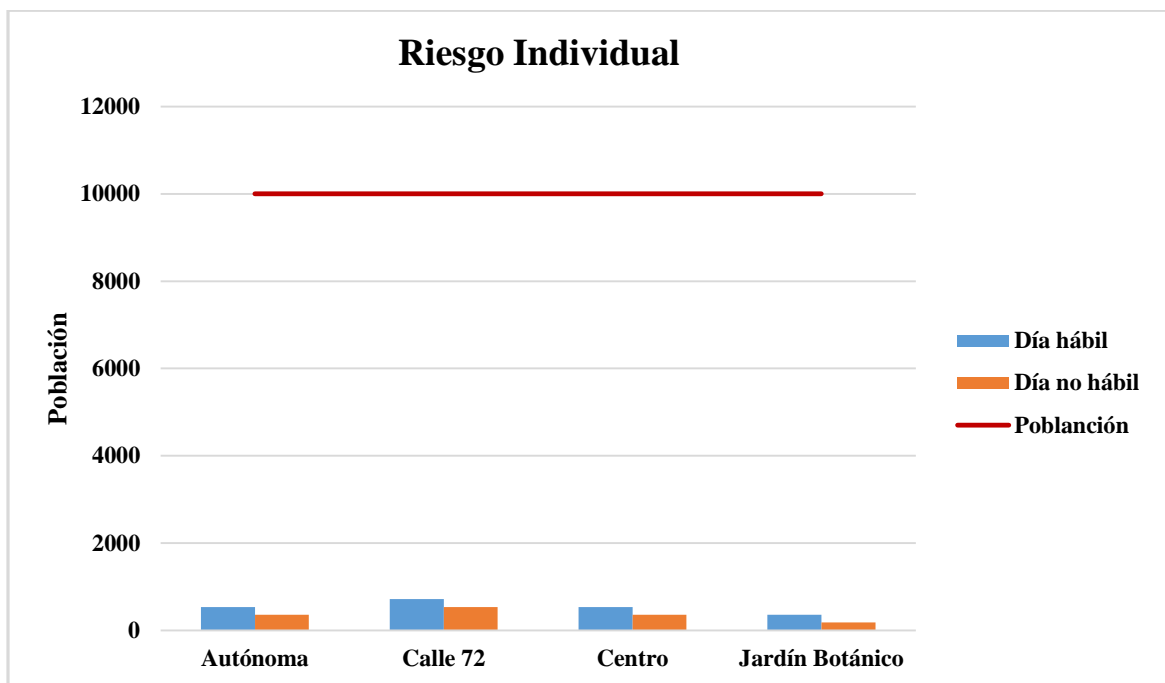


Figura 10. Riesgo individual de contraer cáncer de pulmón por exposición a $PM_{2.5}$

Fuente: Autores.

Como se puede observar a través de la Figura 10 en el día hábil el riesgo de contraer cáncer de pulmón es mayor en la estación de la Calle 72 con un valor de 714 individuos, por otra parte, en las estaciones de la Autónoma y del Centro son las segundas mayores estaciones con riesgo individual, obteniendo un resultado de 536 para cada una, la zona menos expuesta es una estación del Jardín Botánico con un valor de 357 personas. De manera global, para el día hábil, un individuo tiene el 21.43% de posibilidades de poder enfermarse con cáncer de pulmón en alguna de estas estaciones.

El comportamiento del riesgo individual en el día no hábil es muy similar al día hábil en cada una de las estaciones, ya que el punto con mayor resultado se encuentra nuevamente en la Calle 72 con 532 personas afectadas, en segundo lugar, las estaciones de la Autónoma y el Centro con un valor de 357 ambas. Finalmente, con 178 casos de cáncer de pulmón para la estación del Jardín Botánico. De manera global, para el día no hábil, un individuo tiene el 14.28% de posibilidades de poder enfermarse con cáncer de pulmón en alguna de estas estaciones.

En la Tabla 5 se observan los resultados del Riesgo Poblacional estimado de acuerdo al Tipo de Día (hábil y no hábil), teniendo en cuenta el Riesgo Individual calculado previamente y la población de la ciudad de Barranquilla que, según cifras del DANE (Departamento Administrativo Nacional De Estadística), hay 1'218.475 habitantes proyectados para el año 2015.

Tabla 5. Riesgo poblacional de contraer cáncer de pulmón por exposición a PM_{2.5}.

Riesgo Poblacional		
Tipo de Día	Estación	Casos de cáncer de pulmón ~
Día hábil	Autónoma	65274
	Calle 72	87036
	Centro	65274
	Jardín Botánico	43512
Día no hábil	Autónoma	43512
	Calle 72	65274
	Centro	43511
	Jardín Botánico	21750

~ Posibilidades personales de desarrollar cáncer en Barranquilla con una población

1'218.475 habitantes

Fuente: Autores.

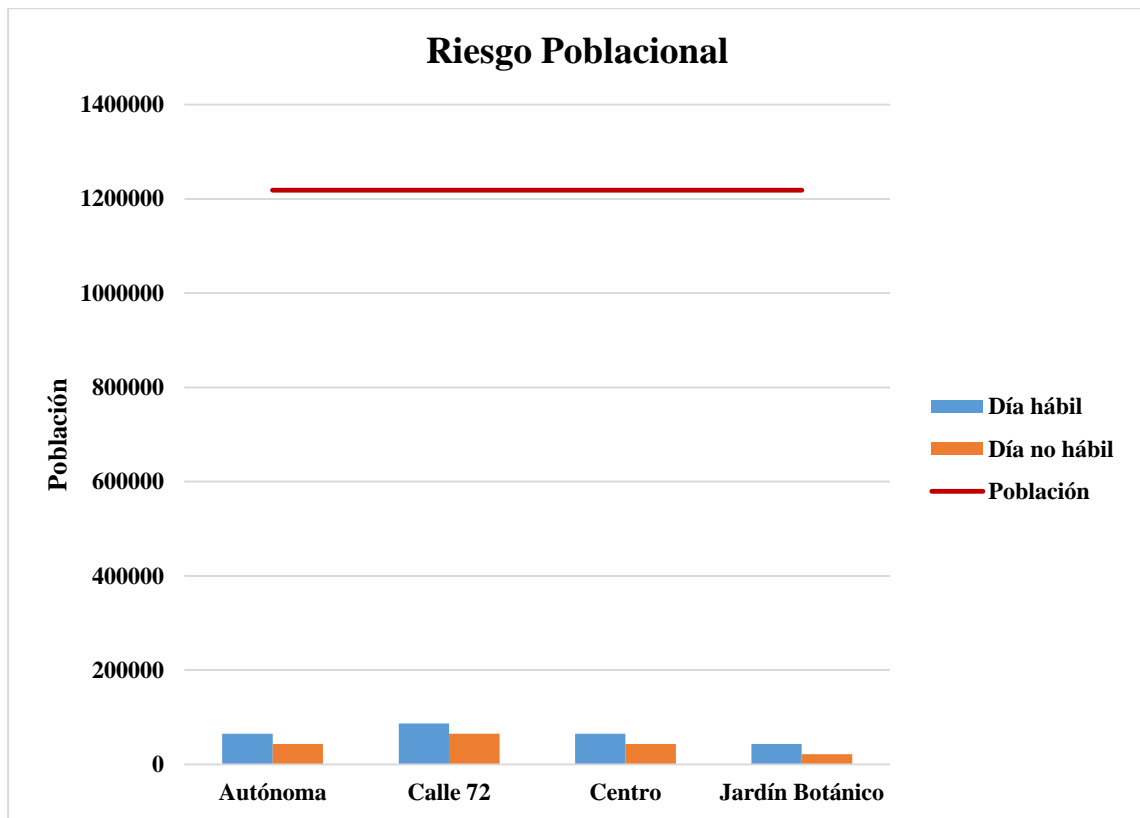


Figura 11. Riesgo poblacional de contraer cáncer de pulmón por exposición a $PM_{2.5}$.

Fuente: Autores.

El riesgo poblacional se refiere a las posibilidades que tiene una población durante toda su vida de desarrollar cáncer (Corey, 2010). En consecuencia, se puede observar a través de la Figura 11 el número de personas que pueden contraer cáncer de pulmón en la ciudad de Barranquilla al estar expuestos a las concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ obtenidas en los días hábiles y no hábiles.

En otras palabras, el mayor número de casos de cáncer de los días hábiles se encuentra en la estación de la Calle 72 con 87036 y el mínimo en el *blanco de estudio*, el Jardín Botánico, registrando un valor de 43512 habitantes con cáncer de pulmón.

Ahora bien, para el día no hábil, el mayor número de casos de cáncer de pulmón se registra nuevamente en la Calle 72 y el mínimo en el Jardín Botánico, con un valor de 65274 y 21750 individuos, respectivamente.

Estos resultados arrojados representan un escenario hipotético que debe interpretarse como el número de casos con cáncer que aparecerían en la población de Barranquilla en el supuesto de que todos sus miembros estuvieran permanentemente expuestos de por vida a la concentración del material particulado PM_{2.5} encontrada en esa comunidad.

7.3.2 Estimación del riesgo no cancerígeno

En la Tabla 6 se observan los resultados de los Índices de Peligro (IP) estimados de acuerdo al Tipo de Día y Género, teniendo en cuenta la Dosis de Referencia (DRf) del contaminante (mg/kg-día) y la dosis de exposición personal medida de un hombre y una mujer a material particulado PM_{2.5}.

Tabla 6. Índices de Peligro de un hombre y una mujer expuestos a PM_{2.5}.

Tipo de Día	Género	Estación	Índice de Peligro
Día hábil	Hombre	Jardín Botánico	0,797
	Mujer	Jardín Botánico	0,440
	Hombre	Autónoma	1,196*
	Mujer	Autónoma	0,660
	Hombre	Calle 72	1,595*
	Mujer	Calle 72	0,881
	Hombre	Centro	1,196*
	Mujer	Centro	0,661
Día no hábil	Hombre	Jardín Botánico	0,157
	Mujer	Jardín Botánico	0,086
	Hombre	Autónoma	0,314
	Mujer	Autónoma	0,173
	Hombre	Calle 72	0,471
	Mujer	Calle 72	0,261
	Hombre	Centro	0,314
	Mujer	Centro	0,174

*Valores que están por encima del límite seguro de exposición ($IP \leq 1$).

Fuente: Autores.

El riesgo para la salud humana generado por sustancias no cancerígenas se considera aceptable cuando el IP es menor o igual a uno ($IP \leq 1$). Por consiguiente, se puede observar en la Figura 12 que los hombres y mujeres de todas las estaciones están a salvo de un riesgo

no cancerígeno a excepción de los hombres que laboran los días hábiles en la estación de la Calle 72 con un IP de 1,595 y en las estaciones de la Autónoma y Centro con un IP de 1,196. Por el contrario, las mujeres que laboran en el Jardín Botánico los días hábiles tienen la menor probabilidad de presentárseles un riesgo no cancerígeno al obtener un IP de 0,440.

Sin embargo, ninguna persona esta proclive a tener un riesgo no cancerígeno los días no hábiles. En consecuencia, una mujer en la estación del Jardín Botánico es quien menos probabilidades tiene con un IP de 0,086, mientras que un hombre en la Calle 72 con un IP de 0,471 es quien más cerca estaría de tener un riesgo no cancerígeno, no obstante, éste individuo está muy por debajo del límite seguro; es decir, se encuentra protegido pero existe el riesgo.

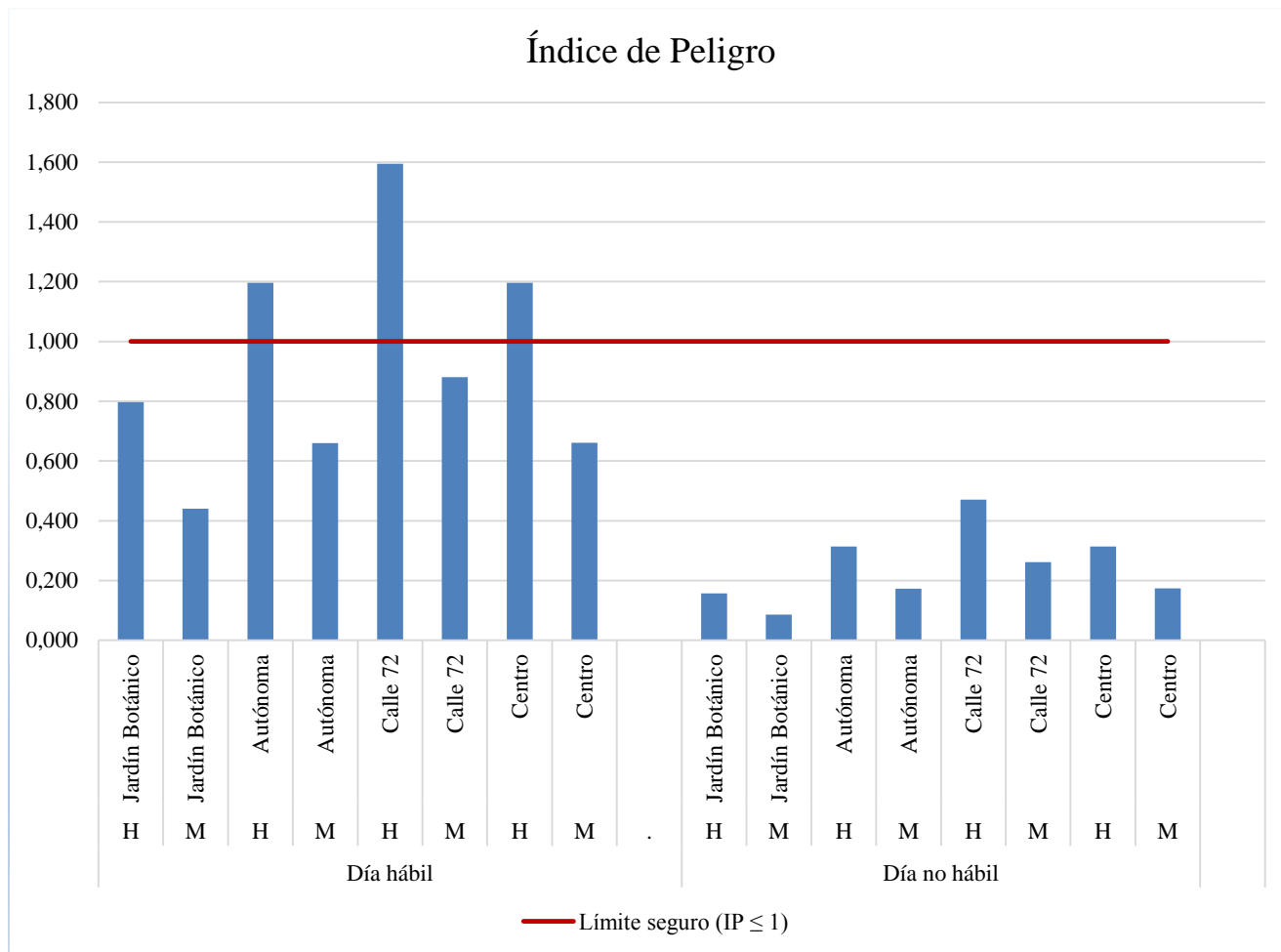


Figura 12. Índices de Peligro de un hombre y una mujer expuestos a PM_{2.5}

Fuente: Autores.

En la Tabla 7 se observan los resultados del Margen de Exposición (ME) en las estaciones de monitoreo, durante las 8 campañas de monitoreo en los días hábiles y no hábiles, teniendo en cuenta el NOAEL del contaminante⁴ y la concentración de exposición personal a material particulado PM_{2.5}.

Tabla 7. Margen de Exposición a PM_{2.5}.

Tipo de Día	Estación	Margen de Exposición
Día hábil	Jardín Botánico	3,863
	Autónoma	2,576
	Calle 72	1,932
	Centro	2,576
Día no hábil	Jardín Botánico	7,728
	Autónoma	3,864
	Calle 72	2,576
	Centro	3,864

Fuente: Autores

El ME proporciona una medida de la probabilidad de que un cierto efecto no cancerígeno en la salud se presente bajo las condiciones de la exposición. Conforme aumente el ME sobre uno ($ME \geq 1$), el riesgo de que existan efectos adversos disminuye.

⁴ Valor de referencia del *diesel engine exhaust* (emisiones de motores diésel).

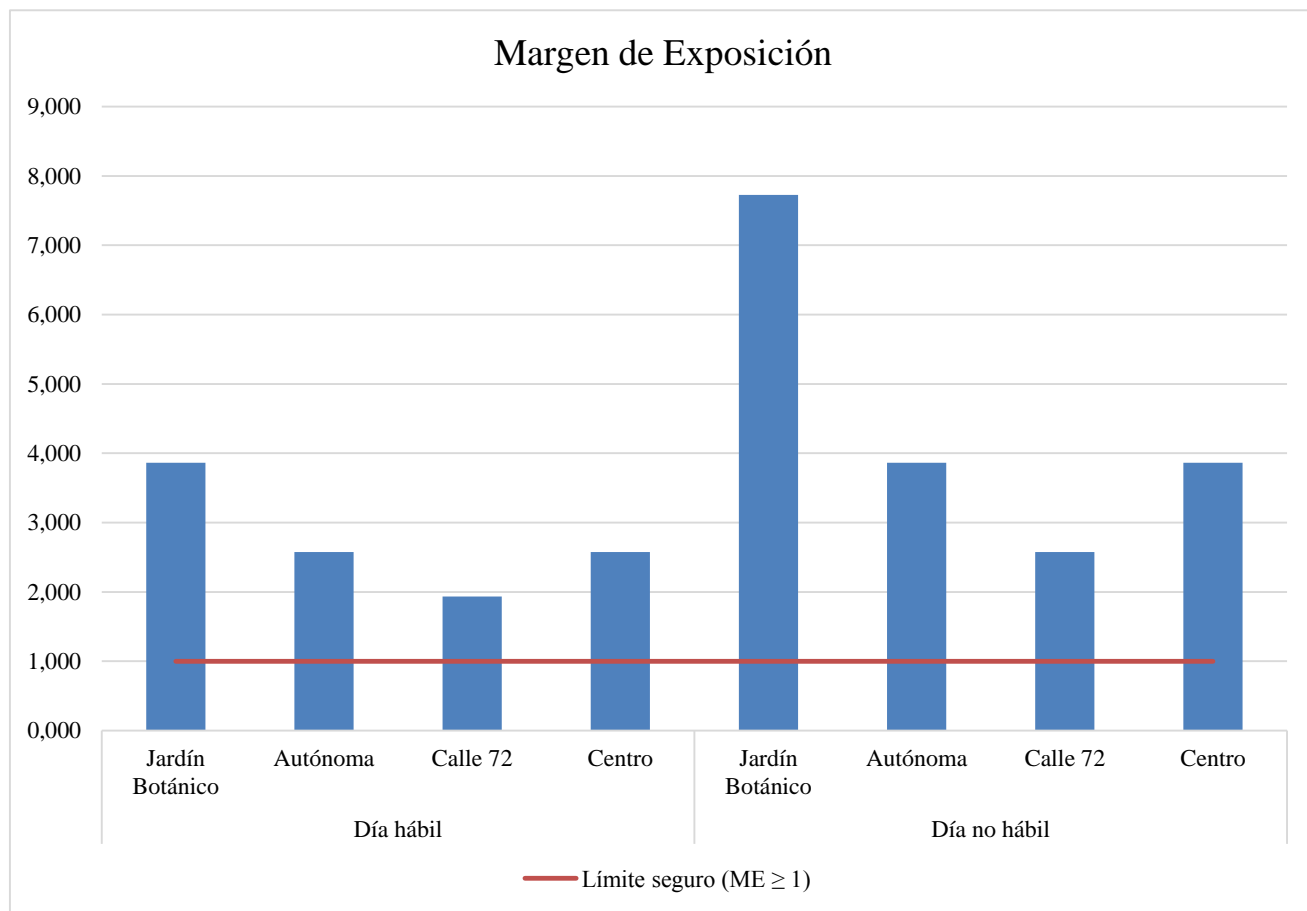


Figura 13. Margen de Exposición a material particulado PM_{2.5}

Fuente: Autores

En consecuencia, se puede observar en la Figura 13 que las personas que laboran en todas las estaciones están a salvo de obtener un riesgo no cancerígeno al compararse la concentración medida en el sitio de muestreo con el nivel más alto de la concentración en el que no se observan efectos dañinos con el contaminante en el aire, siendo el Jardín Botánico el lugar más seguro con un ME de 3,863 para día hábil y 7,728 para día no hábil.

8. Discusión de los resultados

8.1 Cuantificación de la concentración de PM_{2.5}

Al comparar las concentraciones de material particulado PM_{2.5} a nivel de exposición personal con otras investigaciones relacionadas con personas que laboran en vías de tráfico vehicular, se constató que el 75% de los valores conseguidos en este estudio superan las concentraciones de Ngo et al. (2015) en Nairobi que varían de 25 a 145 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, en la publicación de Tovalín-Ahumada, Whitehead & Blanco (2007), cuya delimitación de área son la Ciudad de México y Puebla, las medias de las concentraciones varían de 178,0 a 210,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 79,9 a 133,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, por consiguiente, se infiere que los resultados derivados en Barranquilla se encuentran en el 75% de los resultados de la Ciudad de México y en el 25% de los de Puebla. Por otro lado, Laia et al. (2004) reporta en su estudio llevado a cabo en Taipéi concentraciones medias que van de 109 a 308 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, un 100% de similitud con los resultados obtenidos en este trabajo.

No obstante, es preciso decir que, las concentraciones de material particulado PM_{2.5} adquiridas en las investigaciones en México y Taiwán son resultados evaluados a partir de la media aritmética y, por lo tanto, existen concentraciones mayores a 210,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 308 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

Con respecto al blanco de esta investigación, el Parque Jardín Botánico, se corroboró el papel fundamental de los árboles como paneles recogedores de partículas, puesto que se obtuvieron en esta estación las menores concentraciones de material particulado PM_{2.5}, tanto para el día hábil (119 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) como para el día no hábil (59,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). De hecho, está comprobado que los árboles son característicamente eficaces para capturar partículas menores a 10 μm en vías de alto tráfico vehicular (Tallis et al., 2011; Mullaney, Luckem & Trueman, 2015). Más aún, Song et al. (2015) descubrió en uno de sus estudios que las partículas menores a 2,5 μm representaron el 96% del número total de partículas atrapadas en las hojas de los árboles (Yan et al., 2016).

Sin embargo, los árboles también pueden producir cierto tipo de partículas, como el polen, que limitan la dispersión de los contaminantes en el aire y por lo tanto, aumentan las concentraciones de contaminación local (Gromke & Ruck, 2009; Wania et al., 2012; Salmond et al., 2013; Selmi et al., 2016), por ende, se asume que el resultado obtenido en el día hábil pudo estar ampliamente influenciado por esta característica del reino vegetal, tanto así que, las concentración de $PM_{2.5}$ del día no hábil en las estaciones del Centro y la Autónoma fue igual.

Finalmente, se comprueba que existe un mayor grado de contribución de emisiones de contaminantes en el aire provenientes por vehículos los días hábiles, así como se evidenció en los estudios realizados por Morawska et al. (2002), Wehner et al. (2002), Rose et al. (2006), Barmpadimos et al. (2011), Van Poppel et al. (2012) y Pant & Harrison, (2013).

8.2 Comparación de las dosis de exposición en hombre y mujer a $PM_{2.5}$

La exposición personal a material particulado depende de varios factores que incluyen la edad, el sexo, el tiempo invertido en diferentes microambientes, y la susceptibilidad a los contaminantes del aire. El estudio de la exposición a material particulado también puede ser promovido por las distintas ocupaciones laborales y las condiciones socioeconómicas de un individuo (Steinle et., al 2013; Morawska et al 2013; Nieuwenhuijsen et., al 2014; Pant, Guttikunda, & Peltier, 2016). Otra consideración importante para el análisis de los efectos en la salud es la dosis inhalada que depende de la concentración de contaminantes, así como la función pulmonar y el nivel de actividad de la persona (Pant, Guttikunda, & Peltier, 2016). Bajo estos parámetros, existe una relación consistente con este estudio a nivel local que evalúa la exposición a material particulado $PM_{2.5}$ de hombres y mujeres entre 19 y 65+ años de edad que laboran 8 horas en cercanía a vías de alto tráfico de la ciudad de Barranquilla.

Si bien el objetivo de este estudio no es determinar una relación causal entre la exposición al contaminante atmosférico y las enfermedades pulmonares, hoy en día existe una amplia evidencia de la mortalidad como consecuencia de la exposición a largo plazo del material particulado $PM_{2.5}$, asociándosele un aumento en el riesgo a largo plazo de la mortalidad

cardiopulmonar del 6-13% por cada 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ (Pope et al., 2002; Beelen et al., 2008; Krewski et al., 2009; Kesavachandran et al., 2015). En el caso de Colombia, se han producido escasos estudios que evalúen la relación entre la contaminación del aire y los efectos en la salud teniendo en cuenta la dosis respirable, algunos de los estudios han utilizado aplicaciones de los coeficientes dosis-respuesta obtenidos en estudios internacionales para estimar los efectos sobre la salud y costos (Martínez et al., 2007).

Particularmente en esta investigación, se obtuvo a nivel general una dosis respirable por hombres y mujeres mayor en los días hábiles del muestreo. En las distintas estaciones de monitoreo, los valores reportados de las dosis son mayores en los hombres que en las mujeres; éstos resultados básicamente se acreditan a que los hombres poseen mayores dimensiones corporales en comparación con las mujeres, especialmente en relación con el tórax y con la musculatura que se asocia con la ventilación pulmonar (Martínez et al., 2007).

Las diferencias de resultados también son atribuibles a la exposición de diferentes concentraciones de material particulado $\text{PM}_{2.5}$, que, en relación con el sexo, para quienes están expuestos a nivel de aire más contaminado (Calle 72) se registran valores de dosis respirable mayores con respecto con quienes respiran un aire considerado limpio (Jardín Botánico).

8.3 Estimación del riesgo de la población a $\text{PM}_{2.5}$

En primer lugar, la caracterización del riesgo debe calcularse tanto para efectos cancerígenos como para efectos no cancerígenos; ésta clasificación no es excluyente, por cuanto existen contaminantes que manifiestan efectos de ambos tipos (EPA, 1986; Comunidad de Madrid, 2004). La EPA no ha establecido para el material particulado valores de referencia para caracterizar el riesgo debido a su mezcla compleja de cientos de componentes, es por ello que la estimación del riesgo se basó en la información provista por los valores de referencias del diesel engine exhaust (emisiones de motores diésel). No obstante, la EPA (2002) afirma que las emisiones de motores diésel están constituidas por partículas finas ($\leq 2.5 \mu\text{m}$), lo que hace que sea pertinente la estimación del riesgo bajo esta perspectiva.

En lo concerniente a la caracterización del riesgo cancerígeno, la IARC (2012) clasificó a las emisiones de motores diésel como cancerígenas para los humanos (Grupo 1), teniendo pruebas suficientes que asocian la exposición con un mayor riesgo de cáncer de pulmón (pruebas suficientes) y también observó una asociación positiva (pruebas limitadas) con un mayor riesgo de contraer cáncer de vejiga con trabajadores de diferentes ocupaciones que han estado históricamente expuestos a estas emisiones. A nivel local, las personas que laboran cerca de la estación de la Calle 72, son quienes más probabilidades tienen de desarrollar alguno de estos dos tipos de cáncer al estar hipotéticamente expuestos, durante toda su vida, a las emisiones provenientes de motores diésel que provienen del tráfico vehicular.

Por otra parte, en la caracterización del riesgo no cancerígeno, existe información insuficiente disponible sobre estudios en humanos con exposición a emisiones diésel. Sin embargo, sobre la amplia evidencia que hay en estudios en animales, se considera que este contaminante en el aire representa un peligro para los seres humanos. Los estudios de inhalación de emisiones diésel en el reino animal demuestran un espectro de dependencia en la dosis a causar inflamación y cambios histopatológicos en los pulmones de varias especies animales, incluyendo ratas, ratones, hámsteres y monos (EPA, 2002).

A partir de estos estudios, la EPA proporcionó una estimación de la exposición por inhalación a emisiones diésel en el que las personas pueden estar expuestas durante toda su vida sin ser propensos a experimentar efectos respiratorios adversos no cancerígenos. Este nivel de exposición, conocida como la concentración de referencia (CRf), fue de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, donde luego se convierte matemáticamente en una dosis de referencia (DRf) para compararlo con las dosis estimadas de los seres humanos, obteniéndose en esta investigación un exceso en el límite seguro de exposición para efectos respiratorios adversos no cancerígenos en hombres que laboran cerca de las estaciones de la Calle 72, Autónoma y Centro. No obstante, cuando se compara la concentración de exposición personal con el $\text{NOAEL}_{\text{HEC}}$ de $0,144 \text{ mg}/\text{m}^3$, que es según Yu et al. (1991) la concentración equivalente en humanos luego de usar un modelo matemático al asumir una asociación de los efectos pulmonares causados en ratas, se comprueba que las concentraciones de exposición en las

estaciones de la Calle 72, Autónoma y Centro superan de igual forma el límite seguro de exposición.

Conviene destacar que la información anterior se limita a la exposición que ocurre durante toda la vida del individuo, por ende, los posibles efectos en la salud asociados con la exposición a corto plazo (por ejemplo, episódica) las emisiones de motores diésel, según la EPA (2002) pueden causar irritación aguda (por ejemplo, en los ojos, la garganta y los bronquios), síntomas neurofisiológicos (por ejemplo, sensación de desmayo y náuseas), y los comunes síntomas respiratorios (tos y flema).

9. Conclusiones

La evidencia recopilada, a partir de los estudios y pruebas realizadas, permite concluir que las personas que laboran cerca de vías de alto tráfico vehicular de la ciudad de Barranquilla están expuestas al material particulado inhalable $PM_{2.5}$ generando posibles efectos nocivos en sus sistemas respiratorios.

Las concentraciones de material particulado inhalable $PM_{2.5}$ reportadas en el punto Parque Jardín Botánico tanto para el día hábil y no hábil, son menores a las concentraciones registradas en las estaciones Autónoma, Calle 72 y Centro. Se asume que, los resultados obtenidos pueden estar directamente influenciados por la gran variedad de vegetación que predomina en esa estación de monitoreo, los cuales actúan como recolectores de partículas, siendo muy eficaces a la hora de mitigar los impactos o daños que estos contaminantes producen en la salud humana.

Por otra parte, se reportó el máximo valor de las concentraciones de la fracción fina en la estación de monitoreo de la Calle 72 para el día hábil y no hábil. Incluso, el resultado del muestreo del día no hábil para la Calle 72, fue el mismo generado para las jornadas de los días hábiles del Centro y la Autónoma; por lo que se deduce una alta influencia de contaminación generada gracias al tráfico vehicular en esta zona comercial de la ciudad de Barranquilla.

Al cuantificar las dosis inhalables tanto para hombre y mujer que laboran cerca de éstas vías de alto tráfico vehicular de la ciudad durante ocho (8) horas, se presentaron mayores dosis respirables en el género masculino, debido a la mayor capacidad pulmonar del hombre, para cada tipo de día, mayormente en el día hábil sobre la estación Calle 72. Las menores dosis de hombre y mujer se comprobaron en el Parque Jardín Botánico tanto para día hábil como no hábil, existiendo diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los dos tipos de días.

Finalmente, en la estimación del riesgo cancerígeno en la población, dichos resultados justificaron a la Calle 72 como la principal estación de monitoreo donde las personas tienen

mayor riesgo de contraer cáncer de pulmón, y probablemente cáncer de vejiga, al estar hipotéticamente expuestos durante toda su vida a las concentraciones de PM_{2.5} analizadas. Desde otro punto de vista, en cuanto al riesgo no cancerígeno, se obtuvo un exceso en el límite de seguridad en hombres que laboran cerca de las estaciones de la Calle 72, Autónoma y Centro, de manera que pueden generarse cambios histopatológicos en sus pulmones.

10. Recomendaciones

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, se presentan a continuación una serie de aspectos que se podrían realizar en un futuro para emprender investigaciones similares o fortalecer la investigación realizada:

- Realizar varias campañas de monitoreo durante un año en diferentes lugares de la ciudad de Barranquilla, teniendo en cuenta la temporada seca y de lluvias que se presenta en la capital del Atlántico, de esta manera se pueden obtener resultados más representativos de la problemática de la calidad del aire.
- Efectuar caracterizaciones químicas del material particulado muestreado. De esta manera se puede conocer las fracciones de los compuestos e identificar las fuentes que más aportan a ese contaminante y así realizar una estimación del riesgo por cada componente químico hallado.
- Incentivar el uso de elementos de protección personal, como mascarillas para polvo, para los individuos que laboran en cercanías de vías de alto tráfico, ya que se evidenció en el estudio que esta población trabaja a no más de 5 m del flujo vehicular.
- Determinar las concentraciones de fondo en las mediciones de material particulado debido a que existen fuentes diversas de emisiones de este contaminante en el aire. Por tal motivo, se recomienda la distribución de frecuencia acumulativa log-normal como herramienta para establecer los valores de estas concentraciones en distintas campañas de monitoreo por cada estación de estudio escogida.
- Emplear un anemómetro por estación de muestreo con el objetivo de conocer el grado de asociación entre las variables aleatorias de la concentración del material particulado y las variables climatológicas in situ obtenidas con el uso de este dispositivo.

- Utilizar una microbalanza que permita medir masas pequeñas con gran precisión, capaz de arrojar resultados mayores a 6 decimales, en vista de que los valores se ven influenciados por el tipo de balanza utilizada.

11. Bibliografía

- Acevedo, J. (2006). *Evaluación del riesgo para la salud humana asociado a la exposición a BTEX en las gasolineras de Quito*. Tesis de Maestría, Universidad San Francisco de Quito, Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Quito.
- Altamar, A. (2006). *Estudio de la contaminación atmosférica generada por óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y material particulado en un sector de la ciudad de Bogotá*. Universidad Libre, Bogotá D.C.
- Aneja, V., Wang, B., & Tong, D. (2006). *Characterization of major Chemical Components of fine particulate matter in North Carolina*. North Carolina State University, Department of Marine, Earth, and Atmospheric Sciences. Air & Waste Manage.
- Arciniégas, C. (2011). *Diagnostico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM10*. Manizales.
- ATSDR. (2005). *Public Health Assessment Guidance Manual. Appendix G: Calculating Exposure Doses*. Obtenido de Agency for Toxic Substances and Disease Registry: <http://www.atsdr.cdc.gov/hac/phamanual/appg.html>
- Baker, J. B. (2012). *Air Quality Management Plan*. Southern Californians: South Coast Air Quality Management.
- Ballester, F., Tenías, J., & Pérez, S. (1999). *Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud: una introducción*. Valencia.
- Basté, J. (2013). Determinación del comportamiento de los componentes contaminantes en el sistema de alimentación Diesel. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(4), 65-68. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542013000400011&lng=es&tlng=es.
- Behrentz, E. (2009). *Contaminación del aire por material particulado en inmediaciones de corredores viales*. Bogotá D.C.
- Betha, R., & Balasubramanian, R. (2011). Emissions of particulate-bound elements from stationary diesel engine: Characterization and risk assessment. *Atmospheric Environment*, 45(30), 5273–5281. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.06.060

- Cámara de Comercio. (2008). *Caracterización urbanística, social y ambiental del anillo de innovación*. Bogotá D.C.
- Caro, D., & Uribe, L. (2008). *Evaluación de la concentración de metales contenidos en material particulado respirable y su incidencia sobre ambientes intra - extra murales en dos localidades de Bogotá y otras ciudades del país con antecedentes de contaminación atmosférica*. Tesis de pregrado, Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Bogotá.
- CEPIS/OPS. (2005). Curso de Autoinstrucción Evaluación del Riesgo Asociado a Contaminantes del Aire. Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsci/e/fulltext/riesgo/index.html>
- CIOH. (2007). *Gráficas Multianuales Principales parámetros Meteorológicos sobre la ciudad de Barranquilla*.
- Comunidad de Madrid. (s.f.). *Guía de análisis de riesgos para la salud humana y los ecosistemas*. Obtenido de Capítulo 8. Análisis de riesgos para la salud humana:: <http://www.madrid.org/cs/Satellite?blobcol=urldata&blobheader=application%2Fpdf&blobheadervalue1=Content-Disposition&blobheadervalue1=filename%3DA+Guia+Analisis+Riesgos+Salud+Humana+y+Ecosistemas.pdf&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1352901088712&>
- Contraloría Distrital de Barranquilla. (2013). *Informe del estado de los recursos naturales del distrito especial, industrial y portuario de Barranquilla*. Barranquilla.
- Corey, G. (2010). Evaluación del riesgo asociado a contaminantes del aire .
- El Herald. (2015). *El mapa de los trancones en Barranquilla*. Obtenido de <http://www.elheraldo.co/local/el-mapa-de-los-trancones-en-barranquilla-229828>
- Flora, J. (2002). *Ciudades en Movimiento: Revisión de la estrategia de transporte del banco mundial* . Public Disclosure .
- Garrido, H., & Rodríguez, F. (2011). *Factores de emisión como herramienta en la cuantificación de la efectividad de las acciones emprendidas por las autoridades ambientales en Bogotá*. Bucaramanga.
- Gutiérrez, H. (1997). *Contaminación del aire: riesgos para la salud*.

- IDEAM. (2012). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010*. Bogotá D.C.
- ISHT. (2006). *Toma de muestras de aerosoles. Muestreadores de la fracción inhalable de materia particulada*.
- Ize, I., & Zuk, M. (2010). La evaluación de la exposición al evaluar un riesgo para la salud humana.
- Kam, W., Liacos, J., Schauer, J., Delfino, R., & Sioutas, C. (2012). Size-segregated composition of particulate matter (PM) in major roadways and surface streets. *Atmospheric Environment*, 55, 90-97. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.03.028
- Kesavachandran, C., Kamal, R., Bihari, V., Kumar Pathak, M., & Singh, A. (2015). Particulate matter in ambient air and its association with alterations in lung functions and respiratory health problems among outdoor exercisers in National Capital Region, India . *Atmospheric Pollution Research* , 6 , 618-625. doi:10.5094/APR.2015.070
- Kholod, N., Evans, M., Gusev, M., Yu, S., Malyshev, V., Tretyakova, S., & Barinov, A. (2016). A methodology for calculating transport emissions in cities with limited traffic data: Case study of diesel particulates and black carbon emissions in Murmansk. *Science of the Total Environment*, 547, 305-313. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.12.151
- Laia, C.-H., Lioua, S.-H., Shihb, T.-S., Tsaic, P.-J., Chenc, H.-L., Changd, Y.-C., . . . Jaakkolaf, J. (2004). Exposure to fine particulate matter (PM_{2.5}) among highway toll station workers in Taipei: Direct and indirect exposure assessment. *International Journal of Environmental Health*, 59(3), 138-148. doi:10.3200/AEOH.59.3.138-148
- Linares, C., & Diaz, J. (2008). Las PM_{2.5} y su impacto sobre la salud. (58), 46-49.
- Lioy, P., Waldman, J., Buckley, T., Butler, J., & Pietarinen, C. (1990). *The personal, indoor and outdoor concentrations of PM₁₀ measured in an industrial community during the winter*. The State University of New Jersey, Department of Environmental Sciences.
- Martinez, E., Quiroz, C., Daniels, F., & Montoya, A. (2007). Contaminación Atmosférica y Efectos en la Salud de la población de Medellín y su área metropolitana.
- MAVDT. (2004). *Planes Nacionales de Desarrollo*. Bogotá D.C.

- MAVDT. (2010). *Política de prevención y control de la contaminación del aire*. Bogotá D.C.
- MAVDT. (2010). *Resolución 0610: Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión*.
- Moreno, L., Balaguer, C., & Garrido, S. (2003). *Ingeniería de control: Modelado y control de sistemas dinámicos*. Barcelona, España: Ariel S.A.
- Mullaney, J., Lucke, T., & Trueman, S. (2015). A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. *Landscape and Urban Planning*, 134, 157-166. doi:10.1016/j.landurbplan.2014.10.013
- Ngo, N., Gatari, M., Yan, B., Chillrud, S., Bouhamam, K., & Kinney, P. (2015). Occupational exposure to roadway emissions and inside informal settlements in sub-Saharan Africa: A pilot study in Nairobi, Kenya. *Atmospheric Environment*, 111, 179-184. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.04.008
- OMS. (2005). Guías de Calidad del aire de la OMS relativas al material Particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre .
- OMS/OPS. (2003). *Glosario de Salud Ambiental en español*. Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental, Área de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental , Lima.
- Organización Panamericana de la Salud. (2005). *Evaluación de los efectos de la contaminación del aire en la Salud de América Latina y el Caribe* (primera ed.). Washington, D.C.
- Pant, P., & Harrison, R. (2013). Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review. *Atmospheric Environment*, 77, 78-97. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.04.028
- Pant, P., Guttikunda, S., & Peltier, R. (2016). Exposure to particulate matter in India: A synthesis of findings and future directions. *Environmental Research*, 147, 480-496. doi:10.1016/j.envres.2016.03.011
- Prendéz, M., Corvalán, R., & Cisternas, M. (2007). *Estudio preliminar del material particulado de fuentes estacionarias: aplicación al sistema de compensación de emisiones en la región Metropolitana, Chile*. Chile.
- Riechelmann, H., Rettinger, G., Weschta, M., Keck, T., & Deutschle, T. (2003). *Effects of low-toxicity particulate matter on human nasal*.

- Rojas, N., & Galvis, B. (2005). *Material particulado atmosférico y salud*. Bogotá.
- Rowangould, G. (2015). A new approach for evaluating regional exposure to particulate matter emissions from motor vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 307-317. doi:10.1016/j.trd.2014.11.020
- Sánchez, E. (2007). *Prioridades ambientales para la reducción de la pobreza en Colombia*. Washington DC.
- Sanchez-Triana, E., Ahmed, K., & Awe, Y. (2007). *Prioridades ambientales para la reducción de la pobreza en Colombia: Un análisis ambiental del país para Colombia*. Mayol Ediciones S.A.
- SDE/OPS. (2006). *Curso de autoinstrucción: Aplicación del Método Epidemiológico a la Investigación en Salud Ocupacional*. Obtenido de Módulo 4: Evaluación de exposición en estudios de epidemiología ocupacional: http://www.bvsde.paho.org/cursoa_epi/e/modulo4.html
- Secretaria de Movilidad. (2016). *Parque automotor activo a junio 30 de 2016*. Obtenido de Alcaldía de Barranquilla: http://www.barranquilla.gov.co/movilidad/index.php?option=com_content&id=1686&Itemid=38
- Selmi, W., Weber, C., Rivière, E., Blonda, N., & Mehdi, L. (2016). Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. *Urban Forestry & Urban Greening*, 17, 192-201. doi:10.1016/j.ufug.2016.04.010
- SIAFA. (2011). *Monitoreo Continuo de material particulado en suspensión obtenido de seguridad, higiene y medio ambiente*.
- Singh, V., Khandarwal, R., & Gupta, B. (2003). *Effect of Air Pollution on Peak Expiratory Flow Rate Variability*.
- Spellman, F., & Withing, N. (2014). *Handbook of Mathematics and statistics for the environment*.
- Stevez, J. (2010). *Exposición laboral a contaminación atmosférica: material particulado y efectos respiratorios en la salud de policías de tránsito de Bogotá, Colombia 2008-2009*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Medicina, Bogotá D.C.
- Tovalín-Ahumada, H., Whitehead, L., & Blanco, S. (2007). Personal exposure to PM_{2.5} and element composition: A comparison between outdoor and indoor workers from two

- Mexican cities. *Atmospheric Environment*, 41(35), 7401-7413.
doi:doi:10.1016/j.atmosenv.2007.05.059
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1999). *Air Toxics Hot Spots Program Risk Assessment Guidelines. Part II Technical Support Document for Describing Available Cancer Potency Factors*. Secretary for Environmental Protection, California.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2002). *Health Assessment Document For Diesel Engine Exhaust*. Prepared by the National Center for Environmental Assessment, Washington, DC, for the Office of Transportation. Obtenido de National Technical Information Service, Springfield, VA; PB2002-107661, and <<http://www.epa.gov/ncea>>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2003). *Diesel engine exhaust*. Integrated Risk Information System (IRIS).
- UAP. (2015). *Evaluacion de la exposición y dosis*. Obtenido de <http://documents.mx/documents/epidemiologia-ambiental-y-laboral.html>
- University College London & Universidad de los Andes. (2013). Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia.
- Watt, M., Godden, D., Cherrie, J., & Seaton, A. (1995). *Individual exposure to particulate air pollution and its relevance to thresholds for health effects: a study of traffic wardens*.
- Xu, X., Dockery, D., & Wang, L. (1991). *Effects of air pollution on adult pulmonary function*.
- Yan, J., Lin, L., Zhou, W., Han, L., & Ma, K. (2016). Quantifying the characteristics of particulate matters captured by urban plants using an automatic approach. *Journal of Environmental Sciences*, 39, 259-267. doi:10.1016/j.jes.2015.11.014
- Zuk, M., Tzintzun, M., & Rojas, L. (2007). *Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, México D.F.

12. Anexos

ANEXO 1

ESOS DE LOS FILTROS Y ESPUMAS DEL MUESTREO

PESO INICIAL (g)					PESO FINAL (g)				
ESPONJAS				PROMEDIO	ESPONJAS				PROMEDIO
1	0,0403	0,0403	0,0403	0,0403	1	0,0406	0,0405	0,0405	0,0405
2	0,0377	0,0378	0,0377	0,0377	2	0,0380	0,0381	0,0381	0,0381
3	0,0387	0,0387	0,0388	0,0387	3	0,0392	0,0393	0,0392	0,0392
4	0,0391	0,0392	0,0391	0,0391	4	0,0394	0,0395	0,0394	0,0394
5	0,0406	0,0404	0,0404	0,0405	5	No se usó ésta esponja			
6	0,0392	0,0393	0,0391	0,0392	6	No se usó ésta esponja			
7	0,0381	0,0382	0,0382	0,0382	7	0,0385	0,0385	0,0385	0,0385
8	0,0403	0,0404	0,0404	0,0404	8	0,0404	0,0405	0,0405	0,0405
9	0,0403	0,0402	0,0402	0,0402	9	0,0408	0,0409	0,0408	0,0408
10	0,0395	0,0396	0,0395	0,0395	10	0,0398	0,0397	0,0397	0,0397
11	0,0380	0,0382	0,0384	0,0382	11	No se usó ésta esponja			
12	0,0394	0,0392	0,0393	0,0393	12	No se usó ésta esponja			
FILTROS				PROMEDIO	FILTROS				PROMEDIO
13	0,0543	0,0542	0,0542	0,0542	13	0,0545	0,0546	0,0545	0,0545
14	0,0540	0,0540	0,0540	0,0540	14	0,0544	0,0543	0,0543	0,0543
15	0,0540	0,0540	0,0540	0,0540	15	0,0543	0,0544	0,0544	0,0544
16	0,0540	0,0540	0,0540	0,0540	16	No se usó éste filtro			
17	0,0516	0,0516	0,0516	0,0516	17	No se usó éste filtro			
18	0,0514	0,0511	0,0514	0,0513	18	No se usó éste filtro			
19	0,0548	0,0548	0,0547	0,0548	19	0,0551	0,0550	0,0550	0,0550
20	0,0540	0,0540	0,0540	0,0540	20	No se usó éste filtro			
21	0,0513	0,0513	0,0514	0,0513	21	0,0514	0,0514	0,0515	0,0514
22	0,0516	0,0516	0,0516	0,0516	22	0,0519	0,0520	0,0519	0,0519
23	0,0516	0,0516	0,0516	0,0516	23	0,0518	0,0518	0,0518	0,0518
24	0,0514	0,0516	0,0514	0,0515	24	No se usó éste filtro			

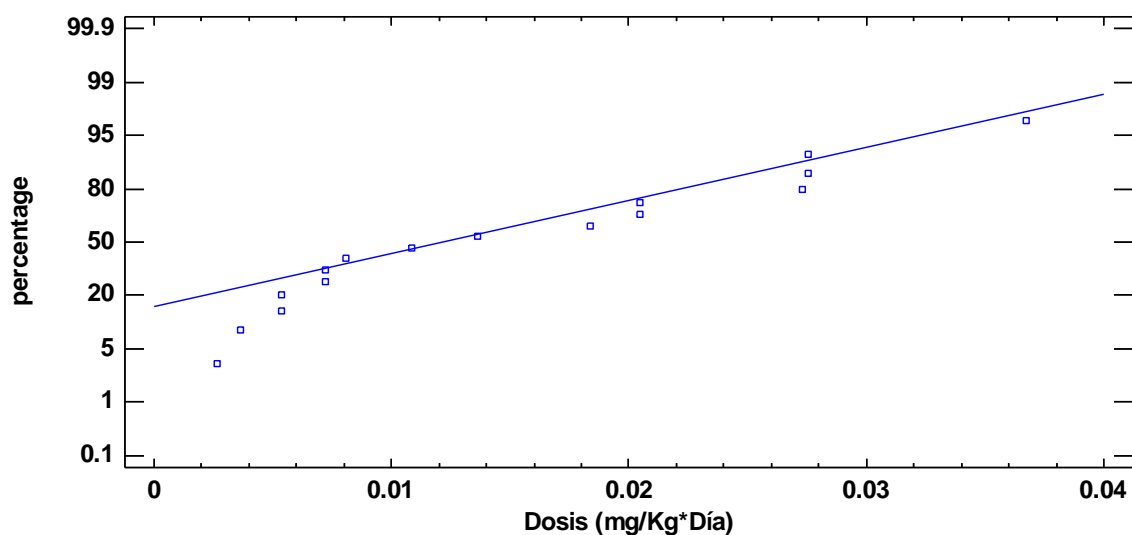
Fracción Gruesa
(> 2.5 um)

Fracción Fina
(< 2.5 um)

ANEXO 2

COMPROBACIÓN DE LA NORMALIDAD DE LOS DATOS MEDIANTE LA PRUEBA DE SHAPIRO-WILK

Inicialmente, para determinar la normalidad o no de los datos, se procedió a emplear la gráfica de probabilidad normal y a su vez la prueba de Shapiro-Wilk con un 95% de confianza, mediante el software Statgraphics Centurion XVI.



Así mismo, de acuerdo a la gráfica se analiza que los valores tienen a seguir una distribución normal sin encontrarse considerablemente dispersos; sin embargo, para determinar con certeza si los datos provienen de dicha distribución se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk

Shapiro-Wilk test	
P-value	0.1116
Std. Skewness	0.979152
Std. Kurtosis	-0.657534

Dado que el valor de P es superior a 0.05 se acepta la hipótesis nula, la cual establece que los datos están distribuidos normalmente. A su vez, los valores de Skewness y Kurtosis están dentro del rango esperado (-2 a 2).

ANEXO 3

REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL MONITOREO Y DEL TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS



Muestreo en la estación Jardín Botánico



Muestreo en la estación Autónoma en el día no hábil (Izq.) y día hábil (Der.)



Muestreo en la estación Calle 72 en el día no hábil



Muestreo en la estación Calle 72 en el día hábil



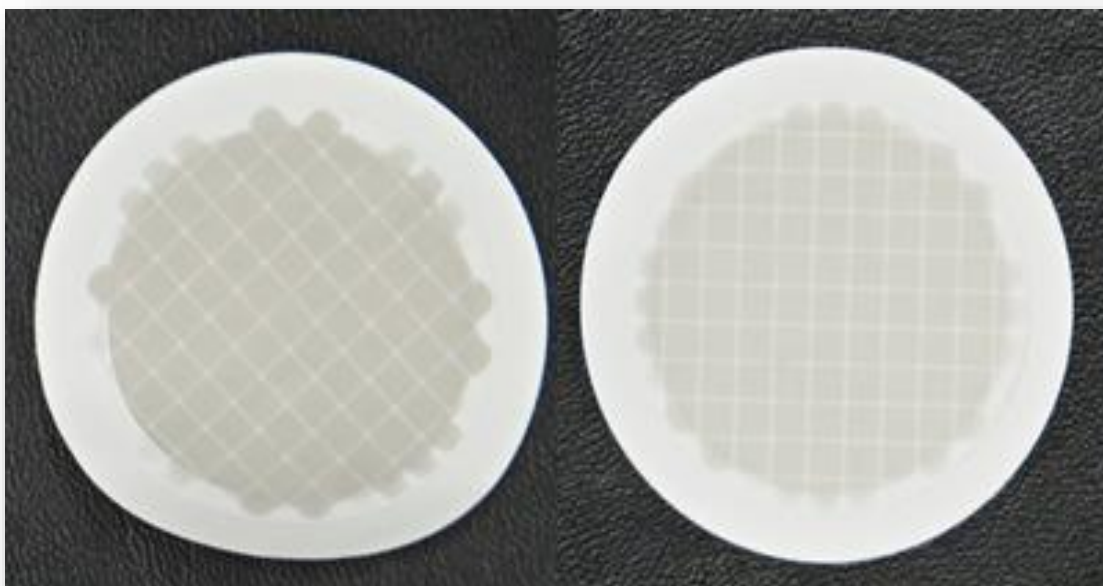
Muestreo en la estación Centro en el día no hábil



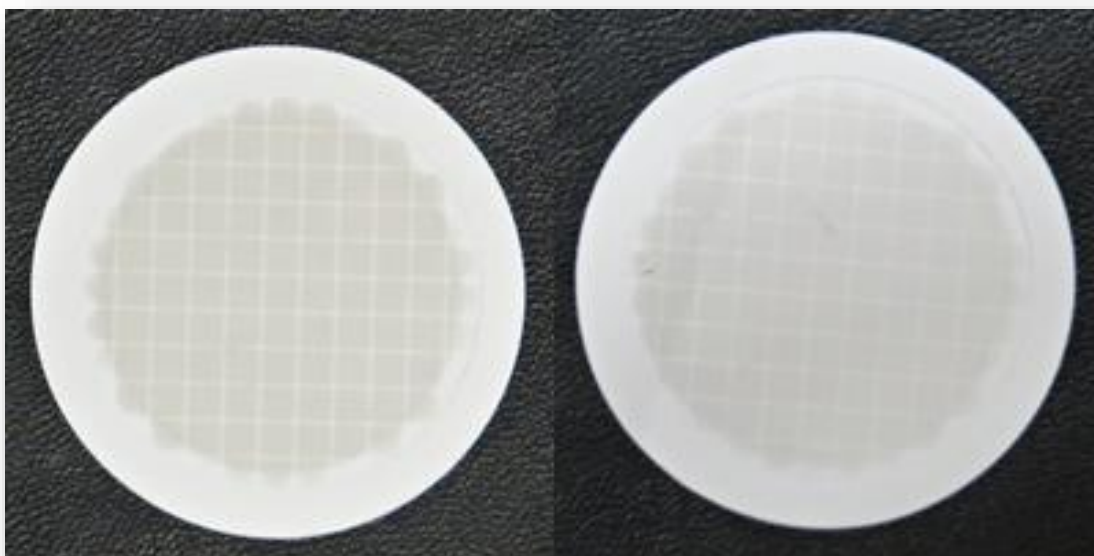
Muestreo en la estación Centro en el día hábil



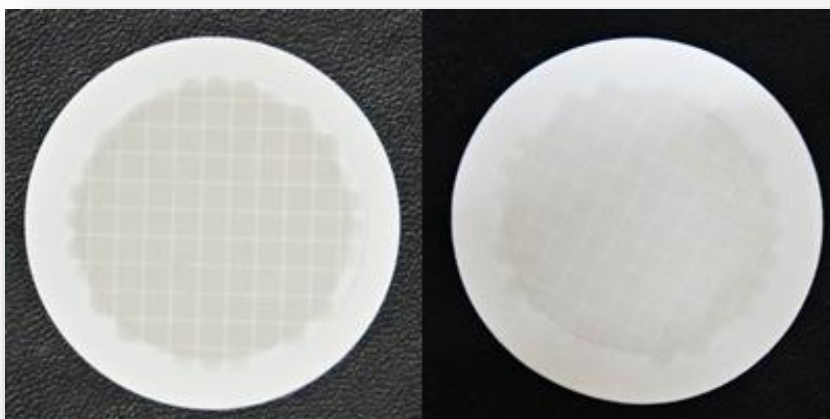
Filtros de teflón con $PM_{2.5}$ utilizados en el Jardín Botánico el día hábil (Izq.) y no hábil (Der.)



Filtros de teflón con $PM_{2.5}$ utilizados en la Calle 72 el día hábil (Izq.) y no hábil (Der.)



Filtros de teflón con $PM_{2.5}$ utilizados en el Centro el día hábil (Izq.) y no hábil (Der.)



Filtros de teflón con $PM_{2.5}$ utilizados en la Autónoma el día hábil (Izq.) y no hábil (Der.)



Modelo de esponja de poliuretano utilizadas para adherir las PM_{10}



Calibración de las bombas personales de muestreo



Pesajes de los filtros en la balanza



Filtros y esponjas en el desecador

ANEXO 4

CÁLCULOS DE LA CONCENTRACIÓN DE PM_{2,5} EN EL DÍA HÁBIL

- **Jardín Botánico**

$$C = \frac{(W2 - W1)}{Q \times T}$$

$$C = \frac{(51,8\text{mg} - 51,6 \text{ mg})}{(5,833 \times 10^{-5} \frac{m^3}{\text{seg}} \times 28800 \text{ seg})}$$

$$C = 0,11905 \text{ mg/m}^3$$

- **Autónoma**

$$C = \frac{(W2 - W1)}{Q \times T}$$

$$C = \frac{(54,3 \text{ mg} - 54,0 \text{ mg})}{(5,833 \times 10^{-5} \frac{m^3}{\text{seg}} \times 28800 \text{ seg})}$$

$$C = 0,17858 \text{ mg/m}^3$$

- **Calle 72**

$$C = \frac{(W2 - W1)}{Q \times T}$$

$$C = \frac{(54,4\text{mg} - 54,0 \text{ mg})}{(5,833 \times 10^{-5} \frac{m^3}{\text{seg}} \times 28800 \text{ seg})}$$

$$C = 0,23810 \text{ mg/m}^3$$

- **Centro**

$$C = \frac{(W2 - W1)}{Q \times T}$$

$$C = \frac{(51,9\text{mg} - 51,6 \text{ mg})}{(5,833 \times 10^{-5} \frac{m^3}{\text{seg}} \times 28800 \text{ seg})}$$

$$C = 0,17858 \text{ mg/m}^3$$

CÁLCULOS DE LA CONCENTRACIÓN DE PM_{2.5} EN EL DÍA NO HÁBIL

- **Jardín Botánico**

$$C = \frac{(W2 - W1)}{Q \times T}$$

$$C = \frac{(51,4\text{mg} - 51,3 \text{ mg})}{(5,833 \times 10^{-5} \frac{m^3}{\text{seg}} \times 28800 \text{ seg})}$$

$$C = 0,05952 \text{ mg/m}^3$$

- **Autónoma**

$$C = \frac{(W2 - W1)}{Q \times T}$$

$$C = \frac{(51,8 \text{ mg} - 51,6 \text{ mg})}{(5,833 \times 10^{-5} \frac{m^3}{\text{seg}} \times 28800 \text{ seg})}$$

$$C = 0,11905 \text{ mg/m}^3$$

- **Calle 72**

$$C = \frac{(W2 - W1)}{Q \times T}$$

$$C = \frac{(54,5\text{mg} - 54,2\text{mg})}{(5,833 \times 10^{-5} \frac{m^3}{\text{seg}} \times 28800 \text{ seg})}$$

$$C = 0,17858 \text{ mg/m}^3$$

- **Centro**

$$C = \frac{(W2 - W1)}{Q \times T}$$

$$C = \frac{(55,0\text{mg} - 54,8 \text{ mg})}{(5,833 \frac{m^3}{\text{seg}} \times 28800 \text{ seg})}$$

$$C = 0,11905 \text{ mg/m}^3$$

ANEXO 5

CÁLCULOS DE LAS DOSIS DE EXPOSICIÓN EN HOMBRE Y MUJER A PM2.5 EN EL DÍA HÁBIL

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW} \quad (1)$$

D: Dosis de exposición (mg/kg-día)

C: Concentración de contaminante mg/m³

IR: Tasa de inhalación m³/día

- Mujer: 11,3 m³/día
- Hombre: 15,2 m³/día

EF: Factor de exposición (Sin unidad)

BW: Peso Corporal: 70 kg promedio para adultos

$$EF = \frac{D \times W \times Y}{AT} \quad (2)$$

EF: Factor de Exposición

D: Días de exposición durante una semana (Días/semana)

W: Semanas de exposición durante un año (Semanas/año)

Y: Número de años de exposición (Años)

AT: Es el periodo promedio el cual se recibe la dosis de exposición (Y x 365 días/año)

$$EF = \frac{D \times W \times Y}{AT}$$

$$EF = \frac{5_{\text{días/semana}} \times 52_{\text{semanas/año}} \times 70_{\text{años}}}{70_{\text{años}} \times 365_{\text{días/año}}}$$

$$EF = 0,71$$

JARDÍN BOTÁNICO

HOMBRE

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW}$$

$$D = \frac{(0,11905 \frac{mg}{m^3} \times 15,2 \frac{m^3}{día} \times 0,71)}{70kg}$$

$$D = \frac{1,28478 mg/día}{70 kg} = 0,01835 mg/kg-día$$

MUJER

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW}$$

$$D = \frac{(0,11905 \frac{mg}{m^3} \times 11,3 \frac{m^3}{día} \times 0,71)}{70kg}$$

$$D = \frac{0,95513 mg/día}{70 kg} = 0,01364 mg/kg-día$$

AUTÓNOMA

HOMBRE

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW}$$

$$D = \frac{(0,17858 \frac{mg}{m^3} \times 15,2 \frac{m^3}{día} \times 0,71)}{70kg}$$

$$D = \frac{1,92723 mg/día}{70 kg} = 0,02753 mg/kg-día$$

MUJER

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW}$$

$$D = \frac{(0,17858 \frac{mg}{m^3} \times 11,3 \frac{m^3}{día} \times 0,71)}{70kg}$$

$$D = \frac{1,43274 mg/día}{70 kg} = 0,02046 mg/kg-día$$

CALLE 72

HOMBRE

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW}$$

$$D = \frac{(0,23810 \frac{mg}{m^3} \times 15,2 \frac{m^3}{día} \times 0,71)}{70 kg}$$

$$D = \frac{2,56957 mg/día}{70 kg} = 0,036708 mg/kg-día$$

MUJER

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW}$$

$$D = \frac{(0,23810 \frac{mg}{m^3} \times 11,3 \frac{m^3}{día} \times 0,71)}{70 kg}$$

$$D = \frac{1,91027 mg/día}{70 kg} = 0,027289 mg/kg-día$$

CENTRO

HOMBRE

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW}$$

$$D = \frac{(0,17858 \frac{mg}{m^3} \times 15,2 \frac{m^3}{día} \times 0,71)}{70 kg}$$

$$D = \frac{1,92723 mg/día}{70 kg} = 0,02753 mg/kg-día$$

MUJER

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW}$$

$$D = \frac{(0,17858 \frac{mg}{m^3} \times 11,3 \frac{m^3}{día} \times 0,71)}{70 kg}$$

$$D = \frac{1,43274 mg/día}{70 kg} = 0,02046 mg/kg-día$$

CÁLCULOS DE LAS DOSIS DE EXPOSICIÓN EN HOMBRE Y MUJER A PM_{2.5} EN EL DÍA NO HÁBIL

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW} \quad (1)$$

D: Dosis de exposición (mg/kg-día)

C: Concentración de contaminante mg/m³

IR: Tasa de inhalación m³/día

- Mujer: 11,3 m³/día
- Hombre: 15,2 m³/día

EF: Factor de exposición (Sin unidad)

BW: Peso Corporal: 70 kg promedio para adulto

$$EF = \frac{D \times W \times Y}{AT} \quad (2)$$

EF: Factor de Exposición

D: Días de exposición durante una semana (Días/semana)

W: Semanas de exposición durante un año (Semanas/año)

Y: Número de años de exposición (Años)

AT: Es el periodo promedio el cual se recibe la dosis de exposición (Y x 365 días/año)

$$EF = \frac{D \times W \times Y}{AT}$$

$$EF = \frac{2_{\text{dias/semana}} \times 52_{\text{semanas/año}} \times 70_{\text{años}}}{70_{\text{años}} \times 365_{\text{días/año}}}$$

$$EF = 0,28$$

JARDÍN BOTÁNICO

HOMBRE

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW}$$

$$D = \frac{(0,05952 \frac{mg}{m^3} \times 15,2 \frac{m^3}{día} \times 0,28)}{70kg}$$

$$D = \frac{0,25331 mg/día}{70 kg} = 3,61881 \times 10^{-3} mg/kg-día$$

MUJER

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW}$$

$$D = \frac{(0,05952 \frac{mg}{m^3} \times 11,3 \frac{m^3}{día} \times 0,28)}{70kg}$$

$$D = \frac{0,18832 mg/día}{70 kg} = 2,69030 \times 10^{-3} mg/kg-día$$

AUTÓNOMA

HOMBRE

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW}$$

$$D = \frac{(0,11905 \frac{mg}{m^3} \times 15,2 \frac{m^3}{día} \times 0,28)}{70kg}$$

$$D = \frac{0,50667 mg/día}{70 kg} = 7,23824 \times 10^{-3} mg/kg-día$$

MUJER

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW}$$

$$D = \frac{(0,11905 \times 11,3 \frac{m^3}{día} \times 0,28)}{70kg}$$

$$D = \frac{0,37667 mg/día}{70 kg} = 5,38106 \times 10^{-3} mg/kg-día$$

CALLE 72

HOMBRE

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW}$$

$$D = \frac{(0,17858 \frac{mg}{m^3} \times 15,2 \frac{m^3}{día} \times 0,28)}{70 kg}$$

$$D = \frac{0,76003 mg/día}{70 kg} = 0,01085 mg/kg-día$$

MUJER

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW}$$

$$D = \frac{(0,17867 \frac{mg}{m^3} \times 11,3 \frac{m^3}{día} \times 0,28)}{70 kg}$$

$$D = \frac{0,56502 mg/día}{70 kg} = 8,07181 \times 10^{-3} mg/kg-día$$

CENTRO

HOMBRE

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW}$$

$$D = \frac{(0,11905 \frac{mg}{m^3} \times 15,2 \frac{m^3}{día} \times 0,28)}{70 kg}$$

$$D = \frac{0,50667 mg/día}{70 kg} = 7,23824 \times 10^{-3} mg/kg-día$$

MUJER

$$D = \frac{(C \times IR \times EF)}{BW}$$

$$D = \frac{(0,11905 \frac{mg}{m^3} \times 11,3 \frac{m^3}{día} \times 0,28)}{70 kg}$$

$$D = \frac{0,37667 mg/día}{70 kg} = 5,38106 \times 10^{-3} mg/kg-día$$

ANEXO 6

ESTIMACIÓN DEL RIESGO CANCERÍGENO EN LA POBLACIÓN

Los factores de las URs han sido estimados para unas cuantas sustancias y pueden obtenerse del banco de datos del programa IRIS o de la información bibliográfica de la ATSDR. Para ésta investigación se utilizó la UR del *diesel engine exhaust* (emisiones de motores diésel) de $3 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3$

JARDÍN BOTÁNICO

- Calculo del Riesgo Individual:

Riesgo Individual = UR ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) x Concentración de exposición medida ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Día hábil

- Riesgo Individual = $3 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3 \times 119,05 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,03571$

El riesgo de cáncer de pulmón sería de aproximadamente 0.03571; es decir, contraerían el cáncer 357 individuos de cada 10.000 que estuvieran expuestos a esa concentración de PM_{2.5} durante todas sus vidas.

Día no hábil

- Riesgo Individual = $3 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3 \times 59,52 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,01785$

El riesgo de cáncer de pulmón sería de aproximadamente 0,01785; es decir, contraerían el cáncer 178 individuos de cada 10.000 que estuvieran expuestos a esa concentración de PM_{2.5} durante todas sus vidas.

- Calculo del Riesgo Poblacional:

Riesgo Poblacional = Riesgo Individual x Población expuesta

Día hábil

- Riesgo Poblacional = $0,03571 \times 1'218.475 = 43.511$

La interpretación es que en el supuesto de que todos los miembros de esta población de un 1'218.475 de individuos permanezcan teóricamente expuestos a una concentración permanente promedio de PM_{2.5} en el aire del orden de 119,05 µg/m³ durante toda su vida, aparecería un total de 43.511 casos de cáncer de pulmón atribuibles a este nivel de contaminación.

Día no hábil

- Riesgo Poblacional = $0,01785 \times 1'218.475 = 21.750$

La interpretación es que en el supuesto de que todos los miembros de esta población de 1'218.475 de individuos permanezcan teóricamente expuestos a una concentración permanente promedio de PM_{2.5} en el aire del orden de 59,52 µg/m³ durante toda su vida, aparecería un total de 21.750 casos de cáncer de pulmón atribuibles a este nivel de contaminación.

AUTÓNOMA

- Calculo del Riesgo Individual:

Riesgo Individual = UR (µg/m³) x Concentración de exposición medida (µg/m³)

Día hábil

- Riesgo Individual = $3 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3 \times 178,58 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,05357$

El riesgo de cáncer de pulmón sería de aproximadamente 0.05357; es decir, contraerían el cáncer 536 individuos de cada 10.000 que estuvieran expuestos a esa concentración de PM_{2.5} durante todas sus vidas.

Día no hábil

- Riesgo Individual = $3 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3 \times 119,05 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,03571$

El riesgo de cáncer de pulmón sería de aproximadamente 0,03671; es decir, contraerían el cáncer 357 individuos de cada 10.000 que estuvieran expuestos a esa concentración de PM_{2,5} durante todas sus vidas.

➤ Cálculo del Riesgo Poblacional:

- Riesgo Poblacional = Riesgo Individual x Población expuesta

Día hábil

- Riesgo Poblacional = $0,03571 \times 1'218.475 = 43.512$

La interpretación es que en el supuesto de que todos los miembros de esta población de 1'218.475 de individuos permanezcan teóricamente expuestos a una concentración permanente promedio de PM_{2,5} en el aire del orden de 178,58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante toda su vida, aparecería un total de 65.274 casos de cáncer de pulmón atribuibles a este nivel de contaminación.

Día no hábil

- Riesgo Poblacional = $0,03571 \times 1'218.475 = 43.512$

La interpretación es que en el supuesto de que todos los miembros de esta población de 1'218.475 de individuos permanezcan teóricamente expuestos a una concentración permanente promedio de PM_{2,5} en el aire del orden de 119,05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante toda su vida, aparecería un total de 43.512 casos de cáncer de pulmón atribuibles a este nivel de contaminación.

CALLE 72

- Cálculo del Riesgo Individual:

Riesgo Individual = UR ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) x Concentración de exposición medida ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Día hábil

- Riesgo Individual = $3 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3 \times 238,10 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,07143$

El riesgo de cáncer de pulmón sería de aproximadamente 0.07143; es decir, contraerían el cáncer 714 individuos de cada 10.000 que estuvieran expuestos a esa concentración de PM_{2,5} durante todas sus vidas.

Día no hábil

- Riesgo Individual = $3 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3 \times 178,58 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,05357$

El riesgo de cáncer de pulmón sería de aproximadamente 0,05357; es decir, contraerían el cáncer 536 individuos de cada 10.000 que estuvieran expuestos a esa concentración de PM_{2,5} durante todas sus vidas.

- Cálculo del Riesgo Poblacional:

Riesgo Poblacional = Riesgo Individual x Población expuesta

Día hábil

- Riesgo Poblacional = $0,07143 \times 1'218.475 = 87.036$

La interpretación es que en el supuesto de que todos los miembros de esta población de 1'218.475 de individuos permanezcan teóricamente expuestos a una concentración permanente promedio de PM_{2,5} en el aire del orden de 238,10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante toda su vida, aparecería un total de 87.036 casos de cáncer de pulmón atribuibles a este nivel de contaminación.

Día no hábil

- $\text{Riesgo Poblacional} = 0,05357 \times 1'218.475 = 65.274$

La interpretación es que en el supuesto de que todos los miembros de esta población de 1'218.475 de individuos permanezcan teóricamente expuestos a una concentración permanente promedio de $\text{PM}_{2.5}$ en el aire del orden de $178,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante toda su vida, aparecería un total de 65.274 casos de cáncer de pulmón atribuibles a este nivel de contaminación.

CENTRO

- Cálculo del Riesgo Individual:

$\text{Riesgo Individual} = \text{UR} (\mu\text{g}/\text{m}^3) \times \text{Concentración de exposición medida} (\mu\text{g}/\text{m}^3)$

Día hábil

- $\text{Riesgo Individual} = 3 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3 \times 178,58 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,05357$

El riesgo de cáncer de pulmón sería de aproximadamente 0,05357; es decir, contraerían el cáncer 536 individuos de cada 10.000 que estuvieran expuestos a esa concentración de $\text{PM}_{2.5}$ durante todas sus vidas.

Día no hábil

- $\text{Riesgo Individual} = 3 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3 \times 119,05 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,03571$

El riesgo de cáncer de pulmón sería de aproximadamente 0,03571; es decir, contraerían el cáncer 357 individuos de cada 10.000 que estuvieran expuestos a esa concentración de $\text{PM}_{2.5}$ durante todas sus vidas.

- Cálculo del Riesgo Poblacional:

$\text{Riesgo Poblacional} = \text{Riesgo Individual} \times \text{Población expuesta}$

Día hábil

- Riesgo Poblacional = $0,05357 \times 1'218.475 = 65.274$

La interpretación es que en el supuesto de que todos los miembros de esta población de 1'218.475 de individuos permanezcan teóricamente expuestos a una concentración permanente promedio de PM_{2.5} en el aire del orden de 178,58 µg/m³ durante toda su vida, aparecería un total de 65.274 casos de cáncer de pulmón atribuibles a este nivel de contaminación.

Día no hábil

- Riesgo Poblacional = $0,03571 \times 1'218.475 = 43.512$

La interpretación es que en el supuesto de que todos los miembros de esta población de 1'218.475 de individuos permanezcan teóricamente expuestos a una concentración permanente promedio de PM_{2.5} en el aire del orden de 119,05 µg/m³ durante toda su vida, aparecería un total de 43.512 casos de cáncer de pulmón atribuibles a este nivel de contaminación.

ANEXO 7

ESTIMACIÓN DEL RIESGO NO CANCERÍGENO EN LA POBLACIÓN

El factor de la CRf y NOAEL_{HEC} han sido estimado para unas cuantas sustancias y pueden obtenerse del banco de datos del programa IRIS o de la información bibliográfica de la ATSDR. Para ésta investigación se utilizó el CRf y NOAEL_{HEC} del *diesel engine exhaust* (emisiones de motores diésel), siendo de 5µm/m³ y 0.144 mg/m³, respectivamente.

Las DRfs (mg/kg-día) se derivan de las CRfs (µm/m³). La dosis de referencia se calcula como se muestra en la siguiente ecuación (CEPIS/OPS, 2005)

$$DRf = \frac{CRf \times IR}{BW}$$

Donde,

CRf: Concentración de referencia (0,005mg/m³)

IR: Tasa de inhalación m³/día)

- Mujer: 11,3 m³/día
- Hombre: 15,2 m³/día

BW: Peso Corporal promedio para adulto (70kg)

$$DRf = \frac{CRf \times IR}{BW}$$

$$0,005\text{mg/m}^3 \text{ (CRf)} = \frac{DRf \times 11,3 \text{ m}^3}{70 \text{ kg}}$$

$$0,005\text{mg/m}^3 \times 70 \text{ kg} = DRf \times 11,3 \text{ m}^3$$

$$\frac{0,35 \text{ mg/m}^3/\text{kg}}{11,3 \text{ m}^3} = DRf$$

$$DRf = 0,03097 \text{ mg/kg-día para mujeres}$$

$$DRf = \frac{CRf \times IR}{BW}$$

$$0,005\text{mg/m}^3 (CRf) = \frac{DRf \times 15,2 \text{ m}^3}{70 \text{ kg}}$$

$$0,005\text{mg/m}^3 \times 70 \text{ kg} = DRf \times 15,2 \text{ m}^3$$

$$\frac{0,35 \text{ mg/m}^3/\text{kg}}{15,2 \text{ m}^3} = DRf$$

$$DRf = 0,02302 \text{ mg/kg-día para hombres}$$

JARDÍN BOTÁNICO

- Índice de Peligro (IP):

$$IP = \frac{\text{Dosis de exposición medida} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} - \text{día} \right)}{DRf \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} - \text{día} \right)}$$

- Día hábil

$$IP \text{ en hombres} = \frac{0,01835 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} - \text{día}}{0,02302 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} - \text{día}} = 0,797$$

$$IP \text{ en mujeres} = \frac{0,01364 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} - \text{día}}{0,03097 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} - \text{día}} = 0,440$$

- Día no hábil

$$IP \text{ en hombres} = \frac{3,61881 \times 10^{-3} \frac{\text{mg}}{\text{kg}} - \text{día}}{0,02302 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} - \text{día}} = 0,157$$

$$\text{IP en mujeres} = \frac{2,69030 \times 10^{-3} \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}}{0,03097 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}} = 0,086$$

- Margen de Exposición (ME):

$$ME = \frac{NOAEL_{HEC} (mg/m^3)}{\text{Concentración medida } (mg/m^3)}$$

- Día hábil

$$ME = \frac{0,144 \text{ mg}/m^3}{0,11905 \text{ mg}/m^3} = 1,209$$

- Día no hábil

$$ME = \frac{0,144 \text{ mg}/m^3}{0,05952 \text{ mg}/m^3} = 2,419$$

AUTÓNOMA

- Índice de Peligro (IP):

$$IP = \frac{\text{Dosis de exposición medida } \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} - \text{día} \right)}{DRf \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} - \text{día} \right)}$$

- Día hábil

$$\text{IP en hombres} = \frac{0,02753 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}}{0,02302 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}} = 1,196$$

$$\text{IP en mujeres} = \frac{0,02046 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}}{0,03097 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}} = 0,660$$

- Día no hábil

$$\text{IP en hombres} = \frac{7,23824 \times 10^{-3} \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}}{0,02302 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}} = 0,314$$

$$\text{IP en mujeres} = \frac{5,38106 \times 10^{-3} \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}}{0,03097 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}} = 0,173$$

- Margen de Exposición (ME):

$$ME = \frac{NOAEL_{HEC} (mg/m^3)}{\text{Concentración medida } (mg/m^3)}$$

- Día hábil

$$ME = \frac{0,144 \text{ mg}/m^3}{0,17858 \text{ mg}/m^3} = 0,806$$

- Día no hábil

$$ME = \frac{0,144 \text{ mg}/m^3}{0,11905 \text{ mg}/m^3} = 1,209$$

CALLE 72

- Índice de Peligro (IP):

$$IP = \frac{\text{Dosis de exposición medida } \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} - \text{día} \right)}{DRf \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} - \text{día} \right)}$$

- Día hábil

$$\text{IP en hombres} = \frac{0,03671 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}}{0,02302 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}} = 1,595$$

$$\text{IP en mujeres} = \frac{0,02728 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}}{0,03097 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}} = 0,881$$

- Día no hábil

$$IP \text{ en hombres} = \frac{0,01085 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}}{0,02302 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}} = 0,471$$

$$IP \text{ en mujeres} = \frac{8,07181 \times 10^{-3} \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}}{0,03097 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}} = 0,261$$

- Margen de Exposición (ME):

$$ME = \frac{NOAEL_{HEC} (mg/m^3)}{Concentración medida (mg/m^3)}$$

- Día hábil

$$ME = \frac{0,144 \text{ mg}/m^3}{0,2381 \text{ mg}/m^3} = 0,605$$

- Día no hábil

$$ME = \frac{0,144 \text{ mg}/m^3}{0,17858 \text{ mg}/m^3} = 0,806$$

CENTRO

- Índice de Peligro (IP):

$$IP = \frac{\text{Dosis de exposición medida} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} - \text{día} \right)}{DRf \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} - \text{día} \right)}$$

- Día hábil

$$IP \text{ en hombres} = \frac{0,02753 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}}{0,02302 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}} = 1,196$$

$$\text{IP en mujeres} = \frac{0,02046 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}}{0,03097 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}} = 0,661$$

- Día no hábil

$$\text{IP en hombres} = \frac{7,23824 \times 10^{-3} \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}}{0,02302 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}} = 0,314$$

$$\text{IP en mujeres} = \frac{5,38106 \times 10^{-3} \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}}{0,03097 \frac{\text{mg}}{\text{kg}}\text{-día}} = 0,174$$

- Margen de Exposición (ME):

$$ME = \frac{NOAEL_{HEC} (mg/m^3)}{\text{Concentración medida } (mg/m^3)}$$

- Día hábil

$$ME = \frac{0,144 \text{ mg}/m^3}{0,17858 \text{ mg}/m^3} = 0,806$$

- Día no hábil

$$ME = \frac{0,144 \text{ mg}/m^3}{0,11905 \text{ mg}/m^3} = 1,209$$